

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 08-213300
(43)Date of publication of application : 20.08.1996

(51)Int.Cl. H01L 21/027
G03F 9/00
H01L 21/30

(21)Application number : 07-014870 (71)Applicant : NIKON CORP
(22)Date of filing : 01.02.1995 (72)Inventor : SHIRAISHI NAOMASA

(54) METHOD AND DEVICE FOR DETECTING POSITION

(57) Abstract:

PURPOSE: To provide excellent position detection accuracy which is not easily influenced by the surface conditions of a substrate by photodetecting the diffracted light generated from the lattice-shaped mark, which is provided for detecting the position on a substrate, by wavelength component, detecting the mark position information for each photoelectric signal obtained and averaging the information by calculation.

CONSTITUTION: Lattices RG and MG are irradiated with beams LB1 and LB2, which have different wavelength components, from different light sources, and coherent beams BM to be received are photodetected by wavelength. Then, the weighted mean of the results obtained by separately detecting the deviation by using the coherence beams Bm1 and Bm2 of each wavelength is obtained in response to the amplitude of the received light by wavelength. An alignment device for a projection aligner is provided by permitting the lattice RG to be a lattice mark on a mask, the lattice MG to be a mark on a wafer, and the image forming systems G1 and G2 to be projection lenses that project a mask pattern on a wafer.

LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 01.02.2002

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

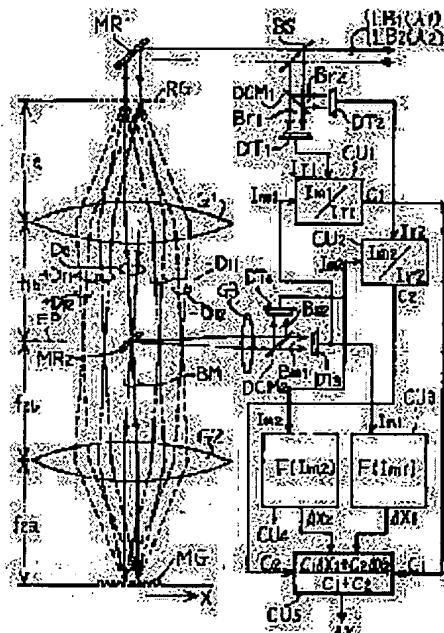
[Date of final disposal for application]

[Patent number] 3622249

[Date of registration] 03.12.2004

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's



decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平8-213300

(43)公開日 平成8年(1996)8月20日

(51)Int.Cl.
H 01 L 21/027
G 03 F 9/00
H 01 L 21/30

識別記号 庁内整理番号
H

F I

技術表示箇所

H 01 L 21/30 522 D
506 E
審査請求 未請求 請求項の数 8 OL (全 29 頁)

(21)出願番号

特願平7-14870

(22)出願日

平成7年(1995)2月1日

(71)出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72)発明者 白石 直正

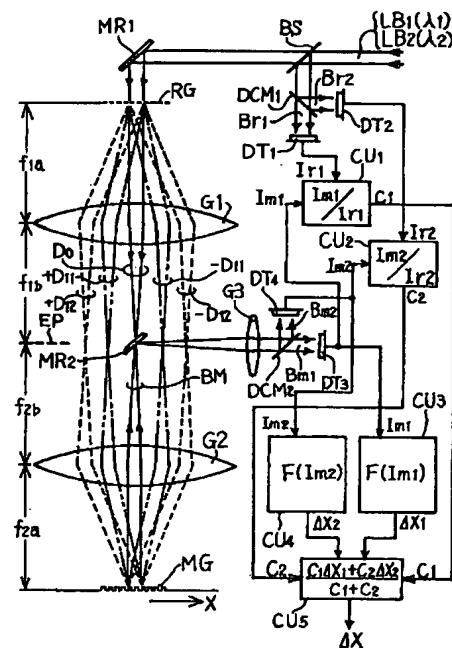
東京都千代田区丸の内3丁目2番3号 株式会社ニコン内

(54)【発明の名称】 位置検出方法及び装置

(57)【要約】

【目的】格子状マークの光学的な非対称性による位置検出誤差を低減する。

【構成】格子マークの照明ビームを多波長化し、マークから発生する回折光の各波長毎の干渉光を個別に光電検出して、各波長毎にマーク位置を求めた後、各マーク位置を干渉光の各波長毎の振幅に応じた重みで加重平均することで非対称性の影響を低減する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 それぞれ所定の周期を有する第1回折格子部材と第2回折格子部材との周期方向に関する相対的な位置関係を検出する方法において、

- a. 互いに異なる第1波長と第2波長とを含む照明ビームを前記第1回折格子部材に照射し、前記第1波長による複数の第1回折ビームと前記第2波長による複数の第2回折ビームとを発生させる段階と；
- b. 光学的な共役関係を持つ光学系を介して前記複数の第1回折ビームと前記複数の第2回折ビームとを前記第2回折格子部材上に重疊照射することにより、前記第2回折格子部材から複数の再回折ビームを発生させる段階と；
- c. 前記複数の再回折ビームのうち、前記第1回折格子部材と第2回折格子部材との相対的な位置関係の情報を含む特定の再回折ビームを光電検出し、該特定の再回折ビームに含まれる前記第1波長の成分に応じた第1光電信号と前記第2波長の成分に応じた第2光電信号とを出力する段階と；
- d. 前記第1光電信号に基づいて前記位置関係を表す第1の位置誤差量を算出し、前記第2光電信号に基づいて前記位置関係を表す第2の位置誤差量を算出する段階と；
- e. 前記第1光電信号と第2光電信号の各強度に応じて重みを変えて前記第1の位置誤差量と第2の位置誤差量とを加重平均して、前記第1回折格子部材と第2回折格子部材との相対的な位置関係を確定する段階とを含むことを特徴とする位置検出方法。

【請求項2】 位置検出すべき基板上に形成された回折格子に照明光を投射し、該回折格子からの回折光を光電検出することによって前記基板の位置を検出する方法において、

- a. 前記回折格子に互いに異なる波長成分を含む照明ビームを投射し、前記回折格子から各波長成分を含む複数の回折ビームを発生させる段階と；
- b. 該発生した複数の回折ビームのうち第1の波長成分から成る互いに次数差を有する2つの回折ビームの干渉によって作られる第1の干渉ビームを第1の光電素子で受光するとともに、前記複数の回折ビームのうち第2の波長成分から成る互いに次数差を有する2つの回折ビームの干渉によって作られる第2の干渉ビームを第2の光電素子で受光する段階と；
- c. 前記第1の光電素子からの光電信号に基づいて前記回折格子の周期方向に関する第1の位置情報を算出し、前記第2の光電素子からの光電信号に基づいて前記回折格子の周期方向に関する第2の位置情報を算出する段階と；
- d. 前記第1の光電素子からの光電信号の振幅値と前記第2の光電素子からの光電信号の振幅値とに応じて重みを変化させて前記第1の位置情報と第2の位置情報をと

加重平均演算することによって前記回折格子が形成された基板の位置を確定する段階とを備えたことを特徴とする位置検出方法。

【請求項3】 前記照明ビームは互いに異なる中心波長のレーザビームを出力する複数のレーザ光源から供給されることを特徴とする請求項2に記載の位置検出方法。

【請求項4】 前記照明ビームは少なくともほぼ40nm以上の波長帯域にスペクトル強度を有する光源から供給されることを特徴とする請求項2に記載の位置検出方法。

【請求項5】 平板状の被検出物体上に形成された、格子状の位置検出マークに対して、前記位置検出マークの周期性に応じた入射角で、j本（jは1か2）の、相互にコヒーレントな光束を波長の異なる複数組入射し、かつ前記入射光束と前記位置検出マークを、相対走査するとともに、

前記入射光束と前記位置検出マークより発生する回折光のうち、少なくともk個（kは3-j以上の自然数）の次数方向への回折光を次数方向別に別々に受光し、それらの光量変化により前記位置検出マークの位置を検出する位置検出装置において、

前記回折光の受光に際し、前記k個の次数方向のうちの同一次数方向に回折する、波長の異なる光束を別々に受光し、各々の波長の光量変化から、前記位置検出マークの位置をそれぞれ検出するとともに、前記各々の波長の光量変化の振幅の大きさ、及び前記各々の波長の照明光量分の1の重みを掛けて平均した、加重平均を位置検出値とすることを特徴とする位置検出装置。

【請求項6】 前記入射光束と前記位置検出マークとの相対走査として、前記入射光束のうち、同一波長のものどうしを、互いに僅かに振動数の異なる2本の光束とし、かつ異なる入射角で前記位置検出マークに入射させ、形成される両光束の干渉縞を、前記振動数の差に応じた等速度で移動させることにより行うことを特徴とする請求項5に記載の位置検出装置。

【請求項7】 平板状の被検出物体上に形成された、格子状の位置検出マークに対して、前記位置検出マークの周期性に応じた入射角で、j本（jは1か2）の、相互にコヒーレントな光束を波長の異なる複数組入射し、かつ前記入射光束と前記位置検出マークを、相対走査するとともに、

前記入射光束と前記位置検出マークより発生する回折光のうち、少なくともk個（kは3-j以上の自然数）の次数方向への回折光を次数方向別に別々に受光し、それらの光量変化により前記位置検出マークの位置を検出する位置検出方法において、

前記回折光の受光に際し、前記k個の次数方向のうちの同一次数方向に回折する、波長の異なる光束を別々に受光し、各々の波長の光量変化から、前記位置検出マークの位置をそれぞれ検出するとともに、前記各々の波長の

光量変化の振幅の大きさ、及び前記各々の波長の照明光量分の1の重みを掛けて平均した、加重平均を位置検出値とすることを特徴とする位置検出方法。

【請求項8】前記入射光束と前記位置検出マークとの相対走査として、前記入射光束のうち、同一波長のものどうしを、互いに僅かに振動数の異なる2本の光束とし、かつ異なる入射角で前記位置検出マークに入射させ、形成される両光束の干渉縞を、前記振動数の差に応じた等速度で移動させることにより行うことを特徴とする請求項7に記載の位置検出方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、例えば半導体素子等を製造する際にマスクパターンを感光性の基板上に露光するフォトリソグラフィ工程で使用される露光装置に適用されるマスクパターンと感光性基板の相対的位置合わせ技術に関し、特に感光基板上のマークパターンの検出技術に関するものである。

【0002】

【従来の技術】例えば半導体素子、液晶表示素子又は薄膜磁気ヘッド等を製造するためのフォトリソグラフィ工程では、転写用のパターンが形成されたフォトマスク又はレチカル（以下、まとめて「レチカル」という）の像を、投影光学系を介した投影露光法あるいはプロキシミティ露光法により、フォトレジストが塗布されたウエハ（又はガラスプレート等の感光基板）上に転写する露光装置が使用されている。

【0003】このような露光装置においては、露光に先立ってレチカルとウエハとの位置合わせ（アライメント）を高精度に行う必要がある。このアライメントを行うために、ウエハ上には以前の工程で形成（露光転写）された位置検出マーク（アライメントマーク）が形成されており、このアライメントマークの位置を検出することで、ウエハ（ウエハ上の回路パターン）の正確な位置を検出することができる。

【0004】近年、ウエハ（又はレチカル）上のアライメントマークを1次元、又は2次元の格子状にし、その格子マーク上にピッチ方向に対称的に傾斜した2つのコヒーレントビームを投射し、格子マークから同一方向に発生する2つの回折光成分を干渉させて格子マークのピッチ方向の位置や位置ずれを検出する方法が、例えば（A）特開昭61-208220号公報、（B）特開61-215905号公報等で提案された。このうち公報（A）は2つの対称的なコヒーレントビームの周波数を同一にしたホモダイイン方式を開示し、公報（B）は2つの対称的なコヒーレントビームの間に一定の周波数差を持たせたヘテロダイイン方式を開示している。

【0005】さらにヘテロダイイン方式の位置検出装置を縮小投影露光装置内のTTR（スルーザレチカル）アライメント系やTTL（スルーザレンズ）アライメント系

に適用したものが、（C）特開平2-227602号公報、（D）特開平3-2504号公報等で提案されている。これら公報（C）、（D）に開示されたヘテロダイイン方式では、2つの音響光学変調素子（AOM）にHe-Neレーザビームを同時に入射させ、各AOMを例えば25KHz程度の周波数差を持つ高周波駆動信号（一方が80MHz、他方が79.975MHz）で駆動し、各AOMから射出される回折ビームの間に25KHzの周波数差を与えている。そしてそれら2つの回折ビームを、ウェハ上、又はレチカル上の格子マークに所定の交差角で照射するための一対の送光ビームとしている。

【0006】またヘテロダイイン方式では、2つの送光ビーム間の周波数差（25KHz）を基準交流信号とし、格子マークから発生した2つの回折光成分の干渉光（ビート光）を光電検出した信号と基準交流信号との位相差を計測し、それを格子マークのピッチ方向に関する基準点からの位置ずれ量として検出している。以上のようなヘテロダイイン方式では、格子マークを照明する2つの送光ビームの単色性が良好な程、位置ずれの検出精度、分解能が向上し、ナノ・メータオーダーの位置検出、位置合わせが可能となる。しかしながら2つの送光ビームの単色性が良好ということは、格子マークから発生する各種回折光間の波長オーダーの位相が格子マークの非対称性やレジスト層等に応じて敏感に変化し易いことを意味する。

【0007】このうちレジスト層による影響は、露光装置におけるウェハアライメント時の宿命的な問題であり、マーク部分のレジストを局所的に除去するという特別な手法を併用しない限り、又は光学的なマーク検出手法を断念しない限り避けては通れない問題である。そこで、レジスト層による影響、あるいはマークの断面形状の非対称性による影響を低減してより正確な位置検出を可能としたヘテロダイイン方式が（E）特開平6-82215号公報によって提案された。その公報（E）には、波長が異なる複数のビーム、又は白色ビームを用い、このビームを固定の回折格子に照射して得られる2つの回折ビームを1段目のAOMに入射し、このAOMで回折された0次ビーム、+1次回折ビーム、-1次回折ビームを2段目のAOM内で交差するようにリレーすることによって、例えば第1の波長による一対の送光ビームと第2の波長による一対の送光ビームを作り、それら2組の送光ビームを同時にウェハ上の格子マークに投射する手法が開示されている。

【0008】この際、格子マークから発生して光電検出される干渉ビート光には第1の波長成分と第2の波長成分とが含まれるが、それらは光電素子の受光面上で光量として加算された形で光電検出される。このため、レジスト層の薄膜干渉の影響またはマーク断面形状の非対称性の影響による各波長成分毎の干渉ビート光の相互位相

差が強度的に平均化され、より正確な位置検出が可能になるのである。

【0009】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、従来のように、位置検出に使用する照明光束を複数の波長、又は所定の波長帯域幅を有するビームにし、格子マークから発生する複数の波長成分を含む干渉光を同一の光電素子で同時に受光する場合、照明光束の中に強度の高い波長成分があると、格子マークからの干渉光もその波長成分のところで強められ、平均化効果を得る上で問題となることがある。さらに、照明光束中の各波長成分が仮に同じ強度であったとしても、ウェハ等の感光基板の表面状態（レジストの厚みむら、格子マークの非対称性の程度等）によっては、格子マークからの干渉光の各波長成分毎の強度に大きな差が生じることも起こり得る。

【0010】このため、格子マークから発生した複数の波長成分を含む干渉光を单一の光電素子で受光しても、基板の表面状態によっては必ずしも良好な位置検出精度を得られない場合が生じ得る。そこで本発明は上述の問題を解決し、ウェハ等の基板の表面状態に影響され難い位置検出方法、又は装置を提供することを目的とする。さらに本発明は、複数の波長成分を含む照明光束で格子パターン（マーク）を照明した場合でも、波長成分毎の光強度の差に影響され難い位置検出方法、又は装置を提供することを目的とする。さらに本発明は、複数の波長成分を含む照明光束を基板上の格子パターンに照射して格子パターンの位置を計測する際、基板表面の状態に依存した格子パターンの位置計測誤差を低減した高精度な位置合わせ（アライメント）装置を提供することを目的とする。

【0011】

【課題を解決するための手段】そこで本発明では、位置検出すべき基板（ウェハW、又はフィデューシャルマーク板FG）上に形成された回折格子（MG）に照明光を投射し、回折格子（MG）からの回折光を光電検出することによって基板の位置を検出する方法に適用される。そこで図1を参照して本発明の構成を概略的に説明すると、まず、(a)回折格子（MG）に互いに異なる波長成分（ λ_1 、 λ_2 ）を含む照明ビーム（基準格子RGで回折されたビーム $\pm D11$ 、 $\pm D22$ ）を投射し、回折格子（MG）から各波長成分を含む複数の回折ビームを発生させ、(b)発生した複数の回折ビームのうち第1の波長成分（ λ_1 ）から成る互いに次数差（+1次と-1次、又は0次と2次）を有する2つの回折ビームの干渉によって作られる第1の干渉ビーム（Bm1）を第1の光電素子（DT3）で受光するとともに、複数の回折ビームのうち第2の波長成分（ λ_2 ）から成る互いに次数差（+1次と-1次、又は0次と2次）を有する2つの回折ビームの干渉によって作られる第2の干渉ビーム（Bm2）を第2の光電素子（DT4）で受光する。そして次に、

(c)第1の光電素子（DT3）からの光電信号（Im1）に基づいて回折格子（MG）の周期方向に関する第1の位置情報（ ΔX_1 ）を回路ユニットCU3で算出し、第2の光電素子（DT4）からの光電信号（Im2）に基づいて回折格子（MG）の周期方向に関する第2の位置情報（ ΔX_2 ）を回路ユニットCU4で算出する。そして最後に、(d)第1の光電素子（DT3）からの光電信号の振幅値（図1では照明ビームLB1の一部を光電検出する素子DT1の信号を利用）と第2の光電素子（DT4）からの光電信号の振幅値（図1では照明ビームLB2の一部を光電検出する素子DT2の信号を利用）とに応じて重み（C1、C2）を変化させて第1の位置情報と第2の位置情報とを回路ユニットCU5により加重平均演算することによって回折格子が形成された基板の位置を確定するようにした。

【0012】

【作用】一般にウェハ等の表面に形成される位置合わせ、位置計測用のマークは、その表面に微少な段差を持って作られるが、半導体加工工程上のエッティングやスペッター等のウェハプロセス、あるいはフォトレジスト層の塗布ムラによって、多少の非対称性を有している。その非対称性はマーク位置検出時の精度低下を招く。

【0013】格子マークから発生した2つの回折光の相互干渉光を光電検出し、その光電信号を利用する干渉式アライメント法においては、格子マークの非対称性はマーク自体の振幅反射率の非対称性となって位置検出精度の劣化に作用する。すなわち、格子マークを構成するラインの溝底部の深さ等が格子ピッチ方向に差を持ったり、レジスト層の厚みに部分的な差があった場合、マーク自体の振幅反射率の絶対値と位相とは、溝底部の深さやレジスト厚の変化に応じて非対称になる。この結果、格子マークから発生する回折光も例えば0次光に対して右方向に発生する正の次数と左方向に発生する負の次数とで強度や位相が異なるものになってしまふ。このうち強度の差は位置検出精度の劣化にほとんど寄与しないが、位相の変化は位置検出精度に大きな影響を与える。

【0014】ところで格子マーク自体の振幅反射率は、マークの深さやレジスト厚だけでなく、照明光（検出光）の波長によっても大きく変動する。検出光の波長を複数（又はブロードバンド）にすると、各波長成分毎にマーク自体の振幅反射率が異なり、位置検出結果も異なったものとなる。そこで、種々のマーク条件のもとでマーク自体の振幅反射率を想定することにより位置検出精度をシミュレーションすることができる。

【0015】本願発明は、特定の波長のみを含む照明光によって格子マークを照射し、その格子マークから発生する回折光を光電検出する場合、光電信号の強度（照明光束と格子マークの相対走査に伴う信号変化の振幅）が極端に小さくなると、総じて位置検出精度も悪化するというシミュレーション上の結果に基づいて着想されたも

のである。そのシミュレーション結果から、本発明では、單一波長の照明光を用いたときに光電信号の振幅が極端に小さくなるような格子マーク条件であっても、別の波長の照明光を併用した波長毎の位置検出結果を加重平均することで位置検出精度の極端な悪化を防止するようにしたのである。

【0016】そこで、従来のように單一波長の照明光を用いたヘテロダイイン方式での位置検出精度のシミュレーション結果を図18、図19を参照して説明する。このシミュレーションは、レジスト層で被覆されたウエハ上の格子マークに対称的な2方向から一定の周波数差をもつコヒーレントな送光ビームを照射する場合を想定し、格子マークから垂直に発生した±1次回折光の相互干渉光、すなわち干渉ビート光の状態（振幅、位相等）を波長を変化させて観察することで得られたものである。

【0017】図18は、シミュレーションで想定したウエハ等の1次元格子MGとその表面に塗布されたレジスト層PRとの部分拡大断面を模式的に表したものである。ここで、格子MGのピッチP_{mg}は8μm、デューティは1:1、溝の段差（又は深さ）T₂は0.7μmに設定され、格子MGのボトム部にはピッチ方向のテープ（傾き）ΔSとして0.1%の非対称性を設定した。このような格子MGを覆うレジスト層PRは、格子MGのトップ部の表面からの厚さT₁を0.9μmとし、格子MGの各ボトム部の位置に対応したレジスト層表面でのヘコみ量ΔTがΔT=0.3T₂（0.21μm）となるように仮定した。このような図18の格子構造のことを振幅反射率が非対称な格子と呼ぶ。

【0018】図19は、横軸に照明光または±1次回折光を合成した干渉光の波長λ（μm）を取り、縦軸にその干渉光の光量変化に応じた信号の変化分（交流成分）の相対的な振幅と位置検出の誤差量（μm）とを取ったものである。この図19のシミュレーション結果では、ヘテロダイイン方式で受光した干渉光に応じた光電信号の交流成分が丁度零、すなわち直流成分のみになる波長λをHe-Neレーザの波長0.663μmに合わせるように、図18の格子マーク構造とレジスト層の条件を設定した。

【0019】これから明らかに、波長0.663μmのレーザ光を使うと、その波長近傍（±20nm程度）ではマーク位置の検出誤差が非常に大きくなることがわかる。これはヘテロダイイン方式では当然のことで、位相差計測すべき光電信号にビート周波数に応じた交流成分がまったく含まれていなければ、位相差計測自体が不能になるからである。このことは、同じ条件の格子マーク構造とレジスト層のもので、ホモダイイン方式で位置検出する場合も全く同じである。

【0020】そこで、図19のような条件下でも、波長λが0.670μm又は0.725μm程度の半導体レーザを照明ビームにすると、マーク位置の検出誤差を十

分に小さく押さえることができる。このことから、He-Neレーザと半導体レーザ等のように波長が異なる2色の照明ビームを用い、信号の変化分（交流成分）の振幅が大きい方の波長のビーム照射のもとで検出されたマーク位置（又は位置ずれ量）を重視（選択、又は重み付け）することが有効となる。

【0021】あるいは、特定の一方向に進む2つの1次回折光の干渉光のみを検出するのではなく、別な方向に進む0次光と2次回折光との干渉光を光電検出し、その信号に基づいて決定されたマーク位置も考慮するという方法もある。図20は、回折格子マークMGに波長λ1の2つの照射ビーム±L1と波長λ2の2つの照射ビーム±L2とを入射し、格子マークMG上に波長λ1とλ2とで同一の強度分布のピッチP_{if}を持つ干渉縞が生成されるビーム入射条件とした上で、格子マークMGのピッチP_{mg}をP_{mg}=2P_{if}の関係にしたときの0次光、±1次、±2次の各回折光の発生を示したものである。

【0022】図20で格子マークMGと垂直に進む1次回折光±D1nの干渉ビームBMには波長λ1、λ2の両方の成分が含まれている。そして0次光（正規反射光）は、ビーム±L1と±L2とで入射角がわずかに異なるために、それぞれのビーム±L1、±L2に対応して±D01、±D02の4本が互いに異なる方向に進む。ここでD01、D02の添字の1項目は回折次数を表し、2項目は波長（λ1、λ2）を表す。

【0023】さて、ビーム+L1の照射によって発生した2次光-D21はビーム+L1の光路を逆進する方向に進み、ビーム-L1の0次光+D01と干渉する。同様に、他の2次光+D21、-D22、+D22もそれぞれ対応する0次光-D01、+D02、-D02と同一方向に進む。これら0次光と2次光との干渉光も、±1次光の干渉ビームBMと同様に、格子MGと干渉縞との相対変位に応じて強度変化する。

【0024】そこで、波長λ1のみに着目して考えてみると、1次成分（1次光±D11の干渉ビームBM）を光電検出してマークの位置（又は位置ずれ）を求めるとともに、2つの2次成分（0次光+D01と2次光-D21の干渉光と0次光-D01と2次光+D21の干渉光）の夫々を光電検出し、2つの2次成分の夫々の信号を使って個別に求められたマーク位置を平均した値をマークの位置として求める。そして1次成分の信号の振幅値と2次成分の各信号の振幅の平均値との大小関係に応じて、1次成分を使って検出されたマーク位置と2次成分を使って検出されたマーク位置とのいずれか一方を選択する、又は重み付け平均を行う等の方法が有効となる。

【0025】このように、マーク検出に使う回折光の次数を変えるのは、次数に応じて格子MGから発生する回折光の方向が異なるため、ある方向に進む次数成分の干渉光の強度変化の振幅が小さくなつて検出精度が悪化する場合でも、別の方向に進む次数成分の干渉光の強度変

化の振幅はそれ程小さくならず、検出精度を悪化させないことがあるからである。

【0026】このことは図21に示したシミュレーション結果からも確かめられる。図21は、波長0.633 μm のHe-Neレーザを照射ビームとし、図19中の格子MGの段差T2をパラメータとした信号の変化分（交流成分）の振幅と位置検出誤差との関係のシミュレーショングラフであり、ピッチPmg=8 μm 、デューティ1:1、テーパー量 $\Delta S=0.1\%$ はそのままでレジスト層PRの格子のトップ面での厚さT1を1.15 μm としたものである。そして、図21(A)は1次成分（1次光±D11）の干渉ビームBMの場合のシミュレーションであり、図21(B)は2次成分（0次光±D01と2次回折光±D21）の干渉光の場合のシミュレーションである。

【0027】この図21(A)、(B)から理解されるように、1次成分、2次成分の各干渉光を光電検出して得られた信号の振幅成分は、格子マークの形状（段差T2）の微妙な変化に応じて大きく変化する。例えば図21(A)中で、格子の段差T2が0.86 μm のとき、1次成分の干渉光の強度変化の振幅は極めて小さくなり、その結果位置検出誤差も急激に大きくなっている。しかしながら、図21(B)中で段差T2が0.86 μm のところを見てみると、2次成分の干渉光の強度変化は比較的大きく、位置検出誤差の悪化は少ない。尚、図21(A)、(B)中の信号の変化分の振幅はいずれも相対値として表してあるが、そのスケールは図21(A)と(B)とで合わせてある。

【0028】このように、1次成分の干渉光を使った格子マークの位置検出と2次成分の干渉光を使った格子マークの位置検出とを併用し、そのいずれかの一方の結果を採用するようなアルゴリズムを用いる場合も、先の図20のシミュレーションから明らかなように、波長依存性を利用して複数の波長成分の照明光で得られた検出位置（又は位置ずれ）を加重平均することが良い。

【0029】以上のように、検出光の波長を複数とし、各波長成分毎に得られるマーク位置情報を平均化することによって、従来よりも高精度な位置検出が可能となる。また図20に示した通り、ある波長の回折光（干渉光）の光量信号の変化分（交流成分）の振幅が小さいと、その波長の回折光を用いた位置検出精度が劣化する確率が高いというシミュレーション結果も得られている。そこで複数の波長成分の回折光（干渉光）を検出する際、各波長成分毎に検出されたマーク位置を、信号の変化分の振幅が小さいものには小さい重みを、そして振幅が大きいものには大きい重みを掛けて平均化する。このようにすると、大きな誤差を含んでいる確率の高い波長成分の回折光を用いたマーク位置の検出結果には、自動的に小さな重みしかかからず、最終的なマーク位置検出結果もそれなりに精度が維持される。

【0030】また2次成分（0次光と2次回折光の干渉光）の信号を検出する場合も、各波長成分毎に光電検出して得られた信号を使ってマーク位置を個別に求めるために、回折光（干渉光）の受光時に後述するような各波長の相殺効果によってマーク位置が検出できなくなるおそれがある。

【0031】

【実施例】図1は、本発明の第1の実施例による位置検出装置の構成を示し、ここでは2つの回折格子RG、MGの間のピッチ方向（X方向とする）の相対的な位置ずれ量をホモダイイン方式で計測する場合を例示する。照明光束としてのビームLB1、LB2は、それぞれ異なるレーザ光源から互いに異なる波長 λ_1 、 λ_2 で射出され、同軸に合成された上でビームスプリッタBS、ミラーMR1を介して格子RGに垂直に照射される。ビームスプリッタBSはビームLB1、LB2の一部分（数%程度）を振幅分割し、ダイクロイックミラーDCM1を介して光電素子DT1、DT2に導く。ダイクロイックミラーDCM1は波長 λ_1 のビームLB1を90%以上透過して光電素子DT1へ送り、波長 λ_2 のビームLB2を90%以上反射して光電素子DT2へ送る。各光電素子DT1、DT2は、受光した波長 λ_1 のビームの強度値を表す信号Ir1と波長 λ_2 のビームの強度値を表す信号Ir2とを出力する。

【0032】さて、格子RGからはビームLB1、LB2（平行光束）の照射によって、複数の回折光束が発生するが、格子RGを透過型のデューティ1:1の1次元格子とし、そのピッチ方向が図1の紙面内の左右方向だとすると、それら回折光束（回折ビーム）の夫々は図1の紙面内で所定の回折角をもって曲げられる。図1では、それら回折ビームとして波長 λ_1 のビームLB1から生成された1次回折ビーム+D11、-D11、波長 λ_2 のビームLB2から生成された1次回折ビーム+D12、-D12、及び0次ビームD0を示してある。もちろん、各波長のビームLB1、LB2毎に、それ以上の高次回折光も発生するが、ここでは説明を簡略化するために1次回折ビームのみを図示した。

【0033】さて、各回折ビームは前群レンズ系G1と後群レンズ系G2に分かれた結像光学系に入射する。格子RGが前群レンズ系G1の前側焦点距離f1aの位置に配置され、前群レンズ系G1の後側焦点距離f1bの位置と後群レンズ系G2の前側焦点距離f2bの位置とがほぼ一致してフーリエ変換面EPが形成されていると、各1次回折ビームは後群レンズ系G2の後側焦点距離f2aの位置で交差（結像）する。ただし、レンズ系G1、G2は2つの波長 λ_1 、 λ_2 に対して色収差が補正されているものとする。

【0034】図1に示すように、フーリエ変換面（瞳面）EPの中央には小さなミラーMR2が固定され、このミラーMR2によって格子RGからの0次ビームD0

は遮光され、後群レンズ系G 2へ入射することが阻止される。また各1次回折ビームは格子RGから射出するときは、ビームLB1、LB2と同様に平行光束になっているが、前群レンズ系G 1の作用でフーリエ変換面EPの位置でビームウエストとなって收れんする。

【0035】ここで、格子RGのピッチをPrgとする

$$\sin \theta_1 = \lambda_1 / P_{rg}$$

$$\sin \theta_2 = \lambda_2 / P_{rg}$$

ここで $\lambda_1 < \lambda_2$ とすると $\theta_1 < \theta_2$ になり、図1に示したようにフーリエ変換面EPにおいて、1次回折ビーム±D11の方が1次回折ビーム±D12の内側（0次ビームD0側）を通る。

【0036】さて各1次回折ビームは、後群レンズG 2を介して物体側に凹凸形状で形成された被計測用の反射型格子MG上でそれぞれ平行光束となって重畳する。このとき、格子MGのピッチ方向もX方向に一致しており、格子MG上には1次回折ビーム±D11の2光束干渉によって波長 λ_1 の1次元干渉縞（ピッチ方向はX方向）が生成され、1次回折ビーム±D12の2光束干渉によって波長 λ_2 の1次元干渉縞（ピッチ方向はX方向）が生成される。このとき、波長 λ_1 の光と波長 λ_2 の光が異なる波長であるため、1次回折ビーム±D11と±D12の間では干渉がおこらない。そして重要なことは、1次回折ビーム±D11によって生成された波長 λ_1 の干渉縞と1次回折ビーム±D12によって生成された波長 λ_2 の干渉縞とは、そのピッチがまったく同一であったかも単一の干渉縞として現れることである。

【0037】その干渉縞の強度分布のピッチPifは格子RGのピッチPrgと結像光学系（G 1、G 2）の倍率Mによって決まり、 $P_{if} = M \cdot P_{rg} / 2$ で表される。例えばピッチPrgを $4 \mu m$ 、倍率Mを $1/4$ （格子RGのパターンサイズが格子MG側で $1/4$ に縮小される）にすると、干渉縞のピッチPifは $0.5 \mu m$ となる。ここで被計測用の格子MGのピッチPmgを $P_{mg} = 2 P_{if}$ の関係、すなわち $P_{mg} = M \cdot P_{rg}$ の関係に定めると、格子MGからは1次回折ビーム±D11を送光ビームとした再回折光が発生する。例えば、1次回折ビーム+D11を送光ビームとして格子MGから発生する1つの再回折光は、格子MGから垂直に進む-1次回折光（波長 λ_1 ）であり、1次回折ビーム-D11を送光ビームとして格子MGから発生する1つの再回折光は格子MGから垂直に進む+1次回折光（波長 λ_1 ）である。これら垂直に進む波長 λ_1 の±1次回折光は相互の位相状態に応じた干渉強度をもち、干渉ビームBMとなってミラーMR2へ達する。

【0038】一方、格子MGからは1次回折ビーム±D12を送光ビームとした再回折光も発生するが、1次回折ビーム+D12の照射により格子MGから発生する-1次回折光（波長 λ_2 ）は格子MGと垂直に進み、1次回折ビーム-D12の照射により格子MGから発生する+1次

と、波長 λ_1 のビームLB1によって発生した1次回折ビーム±D11の回折角（0次ビームD0に対する角度） θ_1 と波長 λ_2 のビームLB2によって発生した1次回折ビーム±D12の回折角 θ_2 はそれぞれ以下の式で表される。

(1)

(2)

回折光（波長 λ_2 ）も格子MGと垂直に進む。これら垂直に進む波長 λ_2 の±1次回折光も相互の位相状態に応じた干渉強度をもち、干渉ビームBMとなってミラーMR2へ達する。すなわち、干渉ビームBMには波長 λ_1 の干渉ビームBm1と波長 λ_2 の干渉ビームBm2とが同軸に含まれている。

【0039】その干渉ビームBMは、ミラーMR2で反射されて光電検出系を構成するレンズ系G 3、ダイクロイックミラーDCM2を介して光電素子DT3、DT4に達する。そのダイクロイックミラーDCM2は波長 λ_1 と λ_2 を分割するものであり、実質的にダイクロイックミラーDCM1と同じものが使われる。従って、干渉ビームBM中の波長 λ_1 の干渉ビームBm1は光電素子DT3で受光され、波長 λ_2 の干渉ビームBm2は光電素子DT4で受光される。

【0040】光電素子DT3は干渉ビームBm1の強度に応じたレベルの光電信号Im1を回路ユニットCU1とCU3に出力し、光電素子DT4は干渉ビームBm2の強度に応じたレベルの光電信号Im2を回路ユニットCU2とCU4に出力する。回路ユニットCU1は光電素子DT1からの信号Ir1と光電信号Im1の振幅値との比C1をIm1/Ir1の演算によって求め、回路ユニットCU2は光電素子DT2からの信号Ir2と光電信号Im2の振幅値との比C2をIm2/Ir2の演算によって求める。これらの比C1、C2のデータは後で述べる加重平均を計算する回路ユニットCU5に出力される。

【0041】さて本実施例ではホモダイイン方式を採用したので、干渉ビームBm1、Bm2の強度は格子RGとMGのX方向の相対位置変化に応じて変化し、仮に格子RG、MGがある状態で静止していると信号Im1、Im2のレベルはそれぞれある一定値を取り続ける。そこで格子RGによって生成された格子MG上の干渉縞と格子MGとをX方向に一定量（干渉縞のピッチPif分以上）だけ相対走査させ、その間に生じる信号Im1、Im2の正弦波状のレベル変化におけるピーク値とボトム値をサンプリングし、その差値を振幅値としてそれぞれ回路ユニットCU1、CU2の演算に使うようとする。

【0042】そこで、図2を参照して干渉縞と格子MGとの位置関係の変化に応じた信号Im1（Im2も同様）の変化を説明する。図2（A）、（B）、（C）でピッチPifの干渉縞は2光束干渉であるためきれいな正弦波状の強度分布を有し、格子MGのピッチPmgに対してPmg

= 2 Pif に設定されている。図 2 (A)、(B)、(C) の順に干渉縞が格子 MG に対して右方向に移動していくと、図 2 (D) のように信号 I_{m1} のレベルは正弦波状に変化する。図 2 (B) のように干渉縞の各ピークが格子 MG の段差エッジと重なる位置で信号 I_{m1} は点 B のようにボトムレベルとなる。ここで図 2 (D) 中の点 A のレベルは図 2 (A) の位置関係の場合を表し、点 C のレベルは図 2 (C) の位置関係の場合を表す。

【0043】このように信号 I_{m1} は干渉縞と格子 MG とが X 方向に $P_{mg}/2$ だけ移動する毎に周期的にレベル変化する。このため、予備的に干渉縞と格子 MG とを微動させない限り、検出した信号 I_{m1} のピークレベルやボトムレベルを求ることはできない。以上のこととは信号 I_{m2} についても同様である。信号 I_{m2} は ± 1 次回折光の干渉ビーム B_{m2} の強度を表すから、図 2 (D) 中に想像線で示したように、信号 I_{m1} のレベルと大きく異なることはあっても、信号 I_{m1} に対する位相は極端にずれることはない（ただし、レジストの干渉やマークの非対称性によって数%程度ずれることはある）。このため干渉縞と格子 MG とが静止している任意の位置関係のところで信号 I_{m1} と I_{m2} の各レベルをサンプリングしても、理論上は回路ユニット CU1、CU2 による比 $C1$ 、 $C2$ の演算は可能である。しかしながら、図 2 (D) から明らかなように、信号 I_{m1} 、 I_{m2} がピークとなる点で各レベルをサンプリングした方が各種ノイズの問題や検出精度の点で有利となる。

【0044】一方、回路ユニット CU3、CU4 はそれぞれ信号 I_{m1} 、 I_{m2} の振幅値と予め設定された関数または変換演算式 $F(I_{m1})$ 、 $F(I_{m2})$ とに基づいて、干渉縞と格子 MG の X 方向の位置ずれ量 ΔX_1 、 ΔX_2 を演算する。この位置ずれ量 ΔX_1 、 ΔX_2 は例えば図 2 (D) 中の各信号 I_{m1} 、 I_{m2} のピーク点又はボトム点を基準（原点）として、そこから $\pm P_{mg}/4$ の範囲内の値として求められる。

【0045】関数（または式） $F(I_{m1})$ 、 $F(I_{m2})$ は各信号 I_{m1} 、 I_{m2} が正弦波状であることから、正弦関数または余弦関数を使う。一例として、先に述べた信号 I_{m1} のピークレベルを E_{p1} 、ボトムレベルを E_{b1} とし、検出すべき位置における信号 I_{m1} のレベルを e_1 とする。 $[E_{p1} + E_{b1} (E_{p1} - E_{b1}) \sin \phi_1] / 2 = e_1$ を満たすラジアン ϕ_1 を求め、これをピッチ P_{mg} の値を使った以下の交換式に代入すれば、基準点からのずれ量 ΔX_1 がわかる。

【0046】

(3)

めた比 $C1$ 、 $C2$ を重み係数として以下の演算を行う。

$$\Delta X = (C1 \cdot \Delta X_1 + C2 \cdot \Delta X_2) / (C1 + C2) \quad (4)$$

この演算で求められたずれ量 ΔX が最終的に求めるべき格子 MG の格子 RG に対する位置ずれ量である。

【0047】この演算式から明らかなように、ずれ量 ΔX は干渉ビーム BM 中の強度が高い方の波長成分の干渉ビームを使った位置ずれ量の計測結果の方により多くの重みをかけるようにして決定される。以上のように本実施例では 2 つの異なる波長成分のビーム LB1、LB2 を使って各格子 RG、MG を照射し、受光すべき干渉ビーム BM も波長別に光電検出し、各波長毎の干渉ビーム B_{m1} 、 B_{m2} を使って個別に位置ずれ検出した結果を、波長毎の受光光の振幅に応じて加重平均するようにしたので、より信頼性の高い位置検出結果が得られる。

【0048】以上の図 1 に示した信号処理系（回路ユニット CU1～CU5）のアルゴリズムは、以降で説明する他の実施例においても共通したものであり、各回路ユニットの機能を実現するにあたって格別に変更、改良があるときは、その都度説明する。また図 1 に示した光学配置で、格子 RG をマスク上の格子マークとし、格子 MG をウエハ上のマークとし、結像系 G1、G2 をマスクパターンのウエハへの投影レンズとすれば、投影露光装置でのアライメント装置が実現できる。

【0049】図 3 は第 2 の実施例による概略的な構成を示し、図 1 中の部材やビーム等と同一機能のものには同じ符号を付けてある。この第 2 の実施例では、照明用の

2 つのビーム LB1、LB2 をレンズ系 G4 を介して結像光学系 (G1、G2) の瞳面の中央に配置されたミラー-MR2 に入射させ、このミラー-MR2 で下へ曲げられたビーム LB1、LB2 を後群レンズ系 G2 を介して平行光束にして格子 MG に垂直に照射する。そして格子 MG で回折した波長 λ_1 の 1 次回折ビーム $\pm D_{11}$ と、波長 λ_2 の 1 次回折ビーム $\pm D_{12}$ をレンズ系 G1、G2 を通して格子 RG 上で交差（結像）させる。格子 RG は透過型なので、1 次回折ビーム $\pm D_{11}$ の照射によって格子 RG から発生した再回折光のうちの ± 1 次回折光は格子 RG と垂直に結像光学系と反対方向に進み、ミラー-MR3 とダイクロイックミラー-DCM3 を介して干渉ビーム B_{m1} となって光電素子 DT3 で受光される。1 次回折ビーム $\pm D_{12}$ の照射によって発生した ± 1 次再回折光も干渉ビーム B_{m2} となって干渉ビーム B_{m1} と同じ光路を通り、ダイクロイックミラー-DCM3 で選択されて光電素子 DT4 に達する。その他の構成は図 1 と同じである。

【0050】本実施例はビームの送光と受光との関係を図 1 のものと逆にした構成であるが、この構成は格子 MG を半導体ウエハに形成し、格子 RG をレチクル（マスク）に形成し、そしてレンズ系 G1、G2 をレチクルパターンの投影露光用の縮小投影レンズにした (F) 特開平 3-3224 号公報の装置に適用できる。ただし、公報 (F) に開示された装置では、投影レンズの瞳面 EP

に1次回折ビームを微少量だけ屈折させる小レンズを設け、投影レンズで発生する色収差を補正しているが、図3の実施例を適用するときは、互いにわずかに波長の異なる2組の1次回折ビーム±D11、±D12の夫々に対して最適な補正が成されるような小レンズ（例えば色分散の大きいフリント系の硝材）を設ける必要がある。

【0051】以上、第2の実施例では照明用のビームLB1、LB2を例えればウエハ上の格子MGに直接入射するように構成したので、格子MGから発生する1次回折ビーム±D11、±D21の各強度を、図1中の格子MGから発生する回折ビーム（干渉ビームBM）の強度よりも総じて高めることができる。次に本発明の第3の実施例を図4、図5、図6を参照して説明するが、ここではホモダイイン方式に代わってヘテロダイイン方式を用いる。図4において、3つのレーザ光源LS1、LS2、LS3はそれぞれ異なる波長λ1、λ2、λ3のレーザビームLB1、LB2、LB3を射出する。一例として、レーザ光源LS1はλ1=0.633μmのHe-Neレーザ光源、光源LS2はλ2=0.690μmの半導体レーザ光源、光源LS3はλ3=0.760μmの半導体レーザ光源に設定され、波長の関係はλ1<λ2<λ3に選ばれるものとする。

【0052】これら3本のビームLB1、LB2、LB3はミラーMR、ダイクロイックミラーDCM4、DCM5を介して1本の同軸のビームLB0に合成され、ミラーMRで反射されて回転ラジアル格子板RRGに入射する。この格子板RRGは一方向に等角速度で回転軸C0の回りに高速回転しており、この格子板RRGによって回折された各次数の回折光の周波数を、角速度に応じた分だけ増減させる作用を有する。

【0053】図5は回転ラジアル格子板RRGの拡大斜視図であり、ここでは回転軸C0をXYZ座標系のZ軸と平行に設定し、円形の格子板RRGには円周上に透過型の位相回折格子RGが360度に渡って形成されている。ビームLB0が格子板RRGの格子RGに垂直に入射すると、0次光D0以外に各種の回折光が発生する。本実施例では±1次回折光を用いてヘテロダイイン方式を実現するので、図4、図5では格子板RRGからの±1次回折光のみを示してある。

【0054】さて、先の図1で示したのと同様に格子板RRGの格子RGからは、波長λ1のビームLB1から作られた1次回折ビーム±D11と、波長λ2のビームLB2から作られた1次回折ビーム±D12と、そして波長λ3のビームLB3から作られた1次回折ビーム±D13が発生する。各波長毎に1次回折ビームの回折角θは以下のように表される。

【0055】 $\sin \theta_n = \lambda_n / P_{rg}$

ここでnは波長を表し、P_{rg}は格子RGのピッチを表す。一方、1次回折ビームは波長によらず一定の周波数偏移△fを受け、格子板RRGの格子RGがビームLB

0を横切る速度をVとすると、△f=V/P_{rg}で表され、+1次回折ビームは0次光D0の周波数に対して△fだけ高くなり、-1次回折ビームは0次光D0の周波数に対して△fだけ低くなる。このため回転ラジアル格子板RRGは周波数シフターとして作用する。

【0056】さて、3つの波長成分の1次回折ビーム±D1n(n=1, 2, 3)からなる送光ビーム±LFと0次光D0は図4に示すようにコリメータレンズ10により主光線が互いに平行になるように変換され、光束選択部材12に達する。この光束選択部材12は、いわゆるフーリエ変換面に置かれる空間フィルターとして機能し、ここでは0次光D0が遮断され、1次回折光±D1nによる送光ビーム±LFが通過する。

【0057】その後、送光ビーム±LFは傾斜量が可変な平行平板ガラスで構成された調整光学系14、16、18を介してビームスプリッタ（ハーフミラー）20に達する。調整光学系14は送光ビーム+LFと送光ビーム-LFとのフーリエ空間での間隔を変えることなく、レンズ10の光軸に対して偏心させる機能を有し、調整光学系16、18は送光ビーム+LFと送光ビーム-LFとの夫々の光軸に対する位置を個別に調整する機能を有する。

【0058】その送光ビーム±LFはビームスプリッタ20で2つに分割され、一方は対物レンズ22に入射し、他方は波長選択フィルター24を介して送光ビーム±LF中の特定の波長の1次ビーム、ここではλ2の1次ビーム±D12のみが選択されて集光レンズ（フーリエ変換レンズ）26に入射する。一方対物レンズ22に入射した送光ビーム±LFは、それぞれ平行光束となって互いに異なる角度でウエハW上の格子MGを同時に照射する。これによって格子MG上には、波長λ1の送光ビーム±D11の干渉によって作られた干渉縞、波長λ2の送光ビーム±D12の干渉によって作られた干渉縞、及び波長λ3の送光ビーム±D13によって作られた干渉縞の3つが、同一ピッチ、同一位置で重畳して現れる。さらに送光ビーム+LFと-LFとの間の周波数差2・△fのため、その干渉縞は格子MG上を一方向に等速度で移動しているように観測される。その移動速度は、回転ラジアル格子板RRGの格子RGの速度Vに比例している。なお、図4から明らかなように、ウエハW表面（格子MG）とラジアル格子板RRGとは、コリメータレンズ10と対物レンズ22との合成系によって互いに共役（結像関係）になるように配置されている。そのためラジアル格子板RRGの格子RGの±1次回折光による回折像が、ウエハWの格子MG上に形成されるが、0次光D0が遮へいされているため格子RGのピッチの1/2の回折像（干渉縞強度分布）が形成される。そして、その干渉縞のウエハW上のピッチP_{if}は先の実施例と同様に格子MGのピッチP_{mg}の1/2に設定されている。

【0059】以上のような関係を満たすとき、送光ビ

ム士 L F の照射によって格子 MG から 1 次回折光が垂直に発生する。すなわち送光ビーム + L F の照射によって垂直に発生した 1 次回折光と、送光ビーム - L F の照射によって垂直に発生した 1 次回折光とが干渉した干渉ビーム BM が発生する。この干渉ビーム BM は周波数 $2 \cdot \Delta f$ で強度変調されたビート光となっている。このように、 ± 1 次回折光（干渉ビーム BM）を同一方向に発生させるために、別の見方をすれば対物レンズ 2 2 の焦点距離を F_0 として各波長毎の送光ビーム士 L F のフーリエ変換面上での光軸からの間隔 $D L_n$ を、

$$D L_n = F_0 \cdot \sin \theta_n = \pm F_0 \cdot \lambda_n / P_{mg} \quad (n = 1, 2, 3)$$

に設定すればよい。このような各波長毎の間隔 $D L_n$ の設定は、回転ラジアル格子板 R RG の格子 RG のピッチやコリメータレンズ 1 0 の焦点距離を適当に定めることで調整可能である。

【0060】またウエハ W 上に形成される干渉縞はラジアル格子板 R RG の格子 RG の回折像として結像されているため、原理的には 3 つの波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 のうちの 1 つの波長成分による干渉縞のピッチとウエハ W の格子マーク MG のピッチとが整数倍の関係になっていれば、他の波長成分による干渉縞のピッチも自ずとその関係になっている筈であり、さらに各波長成分毎の干渉縞も完全に合致して相互に位相ずれ、位置ずれを起こしていない筈である。しかしながら、実際には対物レンズ 2 2、コリメータレンズ 1 0 等の光学系の色収差の程度に応じて、各波長成分毎の干渉縞は相互に位置ずれ、位相ずれ、及びピッチずれを起こしてしまう。

【0061】そこでこのようなずれを補正するために、図 4 中の調整光学系 1 4、1 6、1 8 を用いる。これらの光学系 1 4、1 6、1 8 は平行平板ガラスで構成され、その材料として色分散の大きいものを用いると、各波長成分毎にウエハ W 上に形成される干渉縞の相互の位置ずれや位相ずれを微小に変化させることができる。あるいは調整光学系 1 4、1 6、1 8 として、色分散の小さい平行平板ガラスと色分散の大きい平行平板ガラスとを組み合わせ、色分散の大きい平行平板ガラスの傾き調整で各波長成分毎の干渉縞の相互の関係を補正し、その補正によって生じる送光ビーム士 L F のウエハ上での全体的な傾き誤差に関しては、色分散の小さい平行平板ガラスの傾き調整で補正することができる。

【0062】さて、以上のような干渉縞によって照明された格子 MG から垂直に発生した干渉ビーム BM は、対物レンズ 2 2、ビームスプリッタ 2 0 を通過して空間フィルター 2 8 に達する。この空間フィルター 2 8 は対物レンズ 2 2 に関するフーリエ変換面、またはその近傍に配置され、本実施例では干渉ビーム BM（ ± 1 次回折光）のみを透過させる開口を有している。そして空間フィルター 2 8 を透過した干渉ビーム BM はレンズ系（逆フーリエ変換レンズ）3 0 で平行光束に変換された後、

第 1 のダイクロイックミラー 3 2、第 2 のダイクロイックミラー 3 4 の夫々によって波長選択される。

【0063】まず干渉ビーム BM のうち波長 λ_1 の成分のビーム B_{m1} はダイクロイックミラー 3 2 で 90% 以上が反射されて光電素子 3 6 A に受光される。干渉ビーム BM のうち波長 λ_2 の成分のビーム B_{m2} は、ダイクロイックミラー 3 2 を透過した後ダイクロイックミラー 3 4 で 90% 以上が反射されて光電素子 3 6 B に受光され、干渉ビーム BM のうち波長 λ_3 の成分のビーム B_{m3} はダイクロイックミラー 3 2、3 4 を透過して光電素子 3 6 C に受光される。これら光電素子 3 6 A、3 6 B、3 6 C は、先の図 1 中の光電素子 D T3、D T4 と同じ機能を有し、ただ、受光すべき干渉ビーム B_{m1} 、 B_{m2} 、 B_{m3} の夫々がビート周波数 $2 \cdot \Delta f$ で強度変調されている点で異なるだけである。なお、使用する波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 の間隔によっては、ダイクロイックミラー 3 2、3 4 による波長分割が不十分なこともあるので、各受光素子 3 6 A、3 6 B、3 6 C の直前に干渉フィルター（狭帯バンドパスフィルター）を配置してもよい。またダイクロイックミラー 3 2、3 4 はそれぞれ送光系側のダイクロイックミラー D C M5、D C M4 と同じものであることはいうまでもない。

【0064】各光電素子 3 6 A、3 6 B、3 6 C の光電信号 I_{m1} 、 I_{m2} 、 I_{m3} は、格子マーク MG からの干渉ビーム BM が存在する間、いずれもビート周波数 $2 \cdot \Delta f$ と同じ周波数で正弦波状にレベル変化する波形となる。一方、波長選択フィルター 2 4 で選択され、集光レンズ 2 6 に入射した 1 次ビーム士 D 12 は、透過型の参照格子 S G 上に重畠して照射される。ここでも参照格子 S G はコリメータレンズ 1 0 と集光レンズ 2 6 との合成系に関して回転ラジアル格子板 R RG と共に配置されている。このため参照格子 S G 上にも 1 次ビーム士 D 12 の 2 光束干渉による 1 次元の干渉縞が形成され、それはビート周波数 $2 \cdot \Delta f$ に対応した速度で移動する。

【0065】そこで参照格子 S G のピッチとその干渉縞のピッチとを適当に定めると、参照格子 S G から発生した士 1 次回折光が同一方向に干渉ビーム B_{ms} となって進み、それは空間フィルター 3 8 を透過して光電素子 4 0 に受光される。この光電素子 4 0 の光電信号 I_{ms} は、ビート周波数 $2 \cdot \Delta f$ と同じ周波数で正弦波状にレベル変化する波形となり、その信号 I_{ms} がヘテロダイン方式の基準信号となる。

【0066】以上の構成で参照格子 S G は、ガラス板上にクロム層を蒸着し、そのクロム層を透明ラインと遮光ラインとが交互に形成されるようにエッチングして作られているため、少なくともウエハ W 上の格子マーク MG のような非対称性、レジスト層の問題がないほぼ理想的な格子、すなわち振幅透過率が対称的な格子として作られる。このため参照格子 S G に照射される一対の送光ビームは 3 つの波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 のうちいずれか 1 つ

の波長に対応した1次ビームだけでも十分な精度が得られる。もちろん、送光ビーム±LFに含まれる3つの1次ビーム±D11、±D12、±D13の全てを同時に参照格子SGに照射して、ウェハ上の格子マークMGと同様に多色干渉縞を形成するようにしてもよい。

【0067】このように参照格子SG上に多色干渉縞を形成し、この参照格子SGから発生する干渉ビームBMsを各波長毎に分離して光電検出するように構成すると、波長 λ_1 に応じた基準信号、波長 λ_2 に応じた基準信号、及び波長 λ_3 に応じた基準信号が個別に得られるため、波長毎に格子マークMGの位置計測が可能となる。さらにウェハW上に形成される3つの波長成分毎の干渉縞が相互に一定の位置ずれ（位相ずれ）を起こしていても、それを予めオフセット量として計測しておくことも可能となる。そのことについては後で詳しく述べる。

【0068】ところで、図4に示したウェハWは対物レンズ22の光軸と垂直な面（XY平面）内で2次元移動するウェハステージWST上に載置される。このステージWST上の2次元移動は駆動モータを含む駆動源42によって行われ、モータによって送りネジを回転させる方式、又はリニアモータによってステージ本体を直接運動させる方式のいずれでもよい。さらにステージWSTの座標位置はレーザ干渉計44によって逐次計測される。このレーザ干渉計44の計測値は駆動源42のファードバック制御に使われる。さらにウェハステージWSTの一部には、フィデューシャルマーク板FGが設けられている。このマーク板FGには石英ガラスの表面にクロム層でライン・アンド・スペースをパターニングした反射型の強度格子（ピッチはウェハ上の格子MGと同一）が形成されている。このため強度格子は、ウェハW上に凹凸で形成された格子マークMGのような位相格子と異なり、非対称性がなく回折効率が照明光（又は検出光）の波長に依存しないという特徴、すなわち振幅反射率に非対称性がないという特徴を有する。さらにクロム層の反射率も位置検出用の照明光の波長帯（一般には0.5～0.8 μm）では殆ど変化しない。このため、フィデューシャルマーク板FG上の強度格子を用いると、各波長毎に得られた光電信号Im1、Im2、Im3の各振幅の変化や相互の比を正確に求めることができる。

【0069】以上の図4の構成において、光源として半導体レーザを用いるが、この場合半導体レーザ（LS2、LS3）と各ダイクロイックミラーDCM4、DCM5との間に非点収差除去用の整形光学系（傾斜した複数枚の平行平板ガラス等）を設け、1本に合成されたビームLB0の各波長成分毎の光束成分をほぼ等しい径にするのが好ましい。またそれ以外の場合にも、合成後のビームLB0の径を各波長成分毎に揃えるようなビーム整形光学系を設けるのが望ましい。

【0070】また図4では説明を簡単にするために周波

数シフターとして回転ラジアル格子板RRGを用いたが、その他に2つの音響光学変調器（AOM）を用いたり、中心波長 λ_1 で発振する第1のゼーマンレーザ光源と中心波長 λ_2 で発振する第2のゼーマンレーザ光源とを光源として用いてもよい。ただし、ゼーマンレーザの場合、一般的には偏光方向が相補的な2つのレーザビームを発振し、そのビーム間に数百キロHz～数メガHzの周波数差を与えているため、光電検出する干渉ビームのビート周波数もそれなりに高くなり、光電素子36A、36B、36C、40等は応答性の高いPINダイオードやフォトマル等を使うことになる。

【0071】また図4に示した各種ダイクロイックミラーはプリズム等の分散素子に置き換えてよい。この場合、1個のプリズムは、例えば2つのダイクロイックミラーDCM4、DCM5の組、あるいはダイクロイックミラー32、34の組と同じ機能を有する。次に図4の装置に好適な位置検出、位置制御回路の一例を図6を参照して説明する。図4のヘテロダイイン方式の場合、ウェハW上の格子マークMG、又はフィデューシャルマーク板FGから干渉ビームBMが発生している間、各光電素子36A、36B、36C、40からの信号Im1、Im2、Im3、Im4は図7に示すような正弦波状の交流波形となる。

【0072】図7（D）は基準信号となる信号Im4の時間的な強度変化を表し、図7（A）、（B）、（C）はそれぞれウェハW上の格子マークMGからの干渉ビームBMを受光したときの信号Im1、Im2、Im3の時間的な強度変化の一例を示す。ここで信号Im4の位相を基準にすると、信号Im1の位相は信号Im4に対して- $\Delta\phi_1$ だけずれ、信号Im2の位相は信号Im4に対して- $\Delta\phi_2$ だけずれ、そして信号Im3は信号Im4に対して+ $\Delta\phi_3$ だけずれているものとする。また、信号Im1の振幅（交流成分のピーク-to-ピーク）はE1、信号Im2の振幅はE2、信号Im3の振幅はE3であるものとする。

【0073】さて、図6に示された回路ブロックにおいて、各信号Im1、Im2、Im3、Im4はアナログデジタル変換（A/Dコンバータ）回路ユニット50に入力され、ここでサンプリングクロック発生回路52からのクロック信号（パルス）Cpsに応答して各信号のその瞬間の強度レベルがデジタル値に変換される。クロック信号Cpsの周波数は信号Imn（n=1、2、3）、Im4のビート周波数よりも十分に高く定められ、そのクロック信号Cpsは波形メモリ回路ユニット54にも送られ、A/Dコンバータ50からのデジタル値（データ）を記憶する際のメモリアドレスの更新に使われる。従って、波形メモリ回路ユニット54には、図7に示した4つの波形データが、各信号Imn、Im4の所定周期分（例えば、10周期分以上）に渡ってデジタルサンプリングされる。このとき、4つの信号Imn、Im4は共通のクロック信号Cpsによって同時にサンプリングされるので、波形メモ

リ回路ユニット54内の各波形データには時間軸上でのずれがないものとする。なお、回転ラジアル格子板RRGを用いた場合、ピート周波数は数KHz程度が上限であるため、クロック信号Cpsも十数KHz程度でよい。また、(F)特開平6-82215号公報のように2個のAOMをタンデムに配置した周波数シフターを用いる場合、ピート周波数は各AOMに加える高周波数変調信号の周波数の差の2倍で決まるので比較的自由に定めることができる。

【0074】さて、メモリ回路ユニット54内の各波形データは位相差 $\Delta\phi_n$ ($n=1, 2, 3$)、位置ずれ ΔX_n ($n=1, 2, 3$)の検出回路ユニット56に読み込まれ、ここで図7に示したような各位相差 $\Delta\phi_1$ 、 $\Delta\phi_2$ 、 $\Delta\phi_3$ がデジタル演算(フーリエ積分法)により算出される。先に仮定したようにウエハWの格子マークMGのピッチ P_{mg} と、この上に照射される干渉縞のピッチ P_{if} とが $P_{mg}=2P_{if}$ に設定されていると、図7の各波形の1周期は $P_{mg}/2$ に対応している。また一般に位相差計測は±180度の範囲で行われるので、検出回路56は演算された位相差 $\Delta\phi_1$ 、 $\Delta\phi_2$ 、 $\Delta\phi_3$ を、先の式(3)に従って $\pm P_{mg}/4$ の範囲内の位置ずれ量 ΔX_1 、 ΔX_2 、 ΔX_3 に変換する。このずれ量 ΔX_n は参照格子SGに対する格子マークMGの $\pm P_{mg}/4$ 内のずれを表す。

【0075】ここで位相差計測の分解能として0.2度程度が得られるものとすると、ずれ量の分解能はほぼ(0.2/180) $P_{mg}/4$ となり、ピッチ P_{mg} を4μmにすると実用的な範囲として0.002μm(2nm)程度が得られる。一方、信号振幅、及び振幅比検出回路ユニット58は、波形メモリ回路ユニット54に記憶された図7のような各波形データを読み出し、各波形毎の振幅値E1、E2、E3をデジタル演算によって検出する。この検出回路ユニット58には、予めフィデューシャルマーク板FGの格子から発生した干渉ビームBmを各光電素子36A、36B、36Cで受光したときに得られる光電信号Im1、Im2、Im3の各々の振幅値A1、A2、A3が記憶されている。

【0076】すなわち、ウエハW上の格子マークMGを計測する前にフィデューシャルマーク板FGの格子マークを対物レンズ22の下に移動させ、各光電素子36A、36B、36Cから図7のような信号を発生させ、それを波形メモリ回路ユニット54に記憶させた後、振幅検出回路58で振幅値A1、A2、A3を検出して記憶しておく。この際、マーク板FGが検出されるステージWSTの静止位置をレーザ干渉計44から読み取って記憶するとともに、ずれ量検出回路ユニット56で各波長毎の位置ずれ量 ΔX_{b1} 、 ΔX_{b2} 、 ΔX_{b3} も求めておけば、それをベースライン決定時のデータとして利用することができる。

【0077】尚、ここで言うベースラインとは、各波長

毎に計測されたマーク板FG上の格子マークの位置ずれ量 ΔX_{b1} 、 ΔX_{b2} 、 ΔX_{b3} が極めて微少量だけ相互に異なっているときに、その相互の微少誤差分を意味する。本来、図4に示した送光系では波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 の各ビームによってフィデューシャルマーク板FG上に生成される各波長毎の干渉縞が厳密に一致し、各波長毎の光電検出系の電気的な応答性、歪み特性が十分に揃っていれば、マーク板FGの位置ずれ量 ΔX_{b1} 、 ΔX_{b2} 、 ΔX_{b3} の各値は完全に一致するはずである。

【0078】しかしながら現実問題として、分解能が2nm程度になると、その分解能程度に位置ずれ量 ΔX_{b1} 、 ΔX_{b2} 、 ΔX_{b3} が揃うように送光系や検出系を調整しておくことは難しい。そのため、マーク板FGで計測された位置ずれ量 ΔX_{b1} 、 ΔX_{b2} 、 ΔX_{b3} の相互差が図4に示したアライメント系固有のオフセット(ベースライン誤差)として残存することになる。

【0079】そのベースライン誤差は、ウエハW上の格子マークMGを検出して検出回路56で求められる各波長毎の位置ずれ量 ΔX_1 、 ΔX_2 、 ΔX_3 の夫々を、先に求めた位置ずれ量 ΔX_{b1} 、 ΔX_{b2} 、 ΔX_{b3} の夫々で補正計算が可能である。一例として、図4の装置では参照格子SGから得られる干渉ビームBmを波長 λ_1 に制限したため、計測されたフィデューシャルマーク板FGの位置ずれ量 ΔX_{b1} を基準として、 $\Delta X_{b2} - \Delta X_{b1} = \Delta X_{b21}$ 、 $\Delta X_{b3} - \Delta X_{b1} = \Delta X_{b31}$ を計算して記憶しておく。そしてウエハW上の格子マークMGについて計測された位置ずれ量 ΔX_1 、 ΔX_2 、 ΔX_3 に対して、 $\Delta X_2 - \Delta X_1 = \Delta X_{b21}$ になるように ΔX_2 の値を補正計算し、 $\Delta X_3 - \Delta X_1 = \Delta X_{b31}$ になるように ΔX_3 の値を補正計算すればよい。

【0080】もちろん、参照格子SGから得られる干渉ビームBmに各波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 が含まれるように構成し、その各波長毎の干渉ビームを別々に光電検出して基準信号を作る場合は、各基準信号(各波長)毎にフィデューシャルマーク板FGの位置ずれ量 ΔX_{b1} 、 ΔX_{b2} 、 ΔX_{b3} が求まるので、計測されたウエハ上の格子マークMGの位置ずれ量 ΔX_1 、 ΔX_2 、 ΔX_3 を、 $\Delta X_1 - \Delta X_{b1}$ 、 $\Delta X_2 - \Delta X_{b2}$ 、 $\Delta X_3 - \Delta X_{b3}$ のように補正計算すればよい。

【0081】さらに振幅比検出回路ユニット58は、予め記憶してある振幅値A1、A2、A3とウエハW上の格子マークMGを検出したときに得られる振幅値E1、E2、E3との各比C1、C2、C3を、 $C_1 = E_1 / A_1$ 、 $C_2 = E_2 / A_2$ 、 $C_3 = E_3 / A_3$ として算出する。この比C1、C2、C3は、先の図1の実施例で説明した重み係数に相当する。

【0082】以上のようにして求められた位置ずれ量 ΔX_1 、 ΔX_2 、 ΔX_3 と比C1、C2、C3のデータは、加重平均化演算回路ユニット60に送られ、ここで重みを加えた格子マークMGのずれ量 ΔX を算出する。

その演算は次式によって行われる。

$$\Delta X = (C1 \cdot \Delta X1 + C2 \cdot \Delta X2 + C3 \cdot \Delta X3) / (C1 + C2 + C3)$$

こうして求められたずれ量 ΔX は、参照格子SGに対する格子マークMGのピッチ方向のずれであり、そのデータは位置制御、表示器62に送られるとともに、ウエハWをリアルタイムにアライメント（位置決め）する場合にはサーボ制御回路ユニット64にも送られる。

【0083】このサーボ制御回路ユニット64は2つの機能を有しており、その1つはずれ量 ΔX が所定の値になるまで駆動源42をフィードバック制御する機能（ダイレクトサーボモード）である。この機能の場合は、A/Dコンバータ回路50、メモリ回路ユニット54、ずれ量検出回路ユニット56、及び平均化回路ユニット60の動作が逐次繰り返され、極めて短い時間（例えば数msec.）毎にずれ量 ΔX の値が算出される。なお、振幅比検出回路ユニット58による比C1、C2、C3の算出は初めの1回だけでもよいし、ずれ量 ΔX の算出の度に毎回行ってもよい。比C1、C2、C3の算出を毎回行う場合は、加重平均化回路ユニット60によるずれ量 ΔX の算出毎に比C1、C2、C3の値が若干変化することがあることは言うまでもない。また比C1、C2、C3の算出を初めの1回又は複数回だけにする場合は、それ以降同じ格子マークMGを検出する間は同じ比の値が使われる。

【0084】一方サーボ制御回路ユニット64のもう1つの機能は、ウエハステージWSTをレーザ干渉計44の計測値に基づいて移動させる機能（干渉計サーボモード）である。この機能は、例えばステージWST上のフィデューシャルマーク板FGの格子やウエハW上の格子マークMGを対物レンズ22の直下に位置決めしたり、検出された格子マークMGの位置を基準としてウエハW上の任意の点を対物レンズ22の直下に位置決めしたりするときに使われる。この干渉計サーボモードの場合、位置制御器62からウエハステージWSTの目標位置情報がサーボ制御回路ユニット64に出力され、制御回路ユニット64はレーザ干渉計44から読み取ったステージWSTの現在位置と目標位置との偏差が所定の許容範囲（例えば $\pm 0.04 \mu m$ ）に入るよう駆動源42をフィードバック制御する。

【0085】なお、干渉計サーボモードに続いてダイレクトサーボモードを実行する場合、ダイレクトモードによるサーボ可能範囲は格子マークMGのピッチ P_{mg} に対して $\pm P_{mg}/4$ である。もしそれ以上にずれていると、格子マークMGの1ピッチの半分のオフセットが生じたまま位置決めされてしまうからである。そこで、干渉計サーボモードのときのステージWSTの位置決め許容範囲を定的に $\pm 0.04 \mu m$ にするのではなく、格子マークMG（又はフィデューシャルマーク板FG）を検出するときだけ、許容範囲を $\pm [(P_{mg}/4) - \alpha]$ に切

り換えるようにしてもよい。例えばピッチ P_{mg} が $4 \mu m$ のとき、その許容範囲を $\pm 0.5 \mu m$ 程度にすると、通常の許容範囲（ $\pm 0.04 \mu m$ ）よりもはるかにゆるい精度で位置決めサーボが可能なので、追い込み時間が短縮されることになる。そして、そのゆるい許容範囲（ $\pm 0.5 \mu m$ ）に入ったらただちにダイレクトサーボモードに切り換えることで、高速で高精度な位置決め（位置合わせ）が可能となる。

【0086】さて、位置制御、表示器62は上述のサーボモードの切り替え指示の他に、格子マークMGの座標位置や求められたずれ量 ΔX を表示する機能も有する。また場合によっては、格子マークMGを検出したときの重み係数となる比C1、C2、C3の値も記憶、保存する。この場合、ウエハW上の多数の位置に同一の格子マークMGが形成され、それらマークMGの位置を順次検出するときに、比C1、C2、C3も順次記憶しておくと、ウエハW上のどの部分のマークMGに非対称性やレジスト層のむらに起因した問題があったのかを検証することができる。そして、ウエハW上で重み係数（比C1、C2、C3）が大きく変化した部分をグラフィック表示するようにしてもよい。この際、拡散工程やエッチング工程等の化学プロセスを経て、レジスト層を塗布する前のウエハを図4の装置に装着して重み係数の変化を求めれば、その化学プロセスによるウエハ面上の影響を間接的に調べることもできる。さらにそのウエハにレジスト層を塗布して同様に重み係数の変化を求めて塗布前の重み係数の変化と比較すれば、レジスト層による影響を間接的に調べることもできる。

【0087】以上の第3の実施例ではステージWST上にフィデューシャルマーク板FGを設け、これを使って各波長毎の信号振幅の変化率、すなわち比C1、C2、C3を求めるようにしたので、第1の実施例（図1）のように送光ビームLB1、LB2の光強度を直接検出する光電素子DT1、DT2を設ける必要がない。このことは逆に、第1（又は第2）の実施例においても基準となるフィデューシャルマーク板FGを格子MGと並置すれば、光電素子DT1、DT2を設けることなく比C1、C2を検出できることを意味する。

【0088】図8は第4の実施例による信号処理回路の構成を示し、ここでは図4に示した波長選択フィルター24を省略し、参照格子SGからの干渉ビームBmsをダイクロイックミラー等で3つの波長 $\lambda 1$ 、 $\lambda 2$ 、 $\lambda 3$ 毎のビームBms1、Bms2、Bms3に分離し、それらを個別に光電検出する3個の光電素子40A、40B、40Cを用いるものとする。この場合、計測用の光電素子36A、36B、36Cからの各信号I_{m1}、I_{m2}、I_{m3}はそれぞれ光電素子40A、40B、40Cからの参照信号I_{ms1}、I_{ms2}、I_{ms3}との間で位相差検出が行われる。すなわち、計測信号I_{m1}に関しては参照信号I_{ms1}との位相差 $\Delta \phi 1$ を求ることによって、波長 $\lambda 1$ の送

光ビームを使ったときの格子マーク MG の位置ずれ (ΔX_1) が求められる。

【0089】このような構成の場合、波形データを取り込むべき信号の数が多いので、図8に示すように各波長に対応して3組の波形サンプリング回路（図6中のA/Dコンバータ50、クロック発生回路52、メモリ回路54の機能を有する）80A、80B、80Cを設ける。この回路80A、80B、80Cの内部構成はいずれも同一なので、図8では回路80Aのみについて詳細な構成を示し、他の回路80B、80Cでは詳細説明を省略する。

【0090】さて本実施例では、回路80Aに示したように、計測用の干渉ビーム B_{m1} を受光する光電素子36Aからの信号 I_{m1} と、参照用の干渉ビーム B_{ms1} を受光する光電素子40Aからの信号 I_{ms1} とを、それぞれサンプル・ホールド（S/H）回路800、802に入力し、そのS/H回路800、802からの信号レベルをアナログ・マルチプレクサ804を介してアナログ・デジタル変換器（ADC）806に入力する。

【0091】ADC806で変換されたデジタル値は、書き換え自在のメモリ（RAM）808のアクセスされたアドレスに書き込まれる。このRAM808はアドレスカウンタ810によってアドレス値が生成され、アドレス値はクロック信号Cpsに応答してインクリメンタル（又はデクリメント）される。ただしここでは、アドレスカウンタ810に特別な機能を持たせ、クロック信号Cpsをアドレスカウンタの特定の上位ビットの1つにフラグとして供給するように構成されている。これによってRAM808のアドレス空間は2つのページに分けられ、クロック信号Cpsが論理「0」の間は1ページ目のアドレス空間がアクセスされ、クロック信号Cpsが論理「1」の間は2ページ目のアドレス空間がアクセスされる。

【0092】そのクロック信号CpsはS/H回路802にも供給される。さらにクロック信号Cpsはタイミング回路814にも供給され、ADC806のデジタル変換のタイミングとRAM808のデータ書き込みタイミングのための信号（パルス）ノ作成に使われる。従ってクロック信号Cpsが「1」のときは、S/H回路802がホールド状態となり、光電素子36Aの信号 I_{m1} のその時のレベルがアナログマルチプレクサ804を介してADC806に供給され、そのレベルに応じたデジタル値がRAM808の2ページ目のアドレス空間内の1つのアドレス位置に記憶される。逆にクロック信号Cpsが「0」のときはS/H回路802がホールド状態となり、光電素子40Aの信号 I_{ms1} のその時のレベルがマルチプレクサ804を介してADC806に供給され、そのレベルに応じたデジタル値がRAM808の1ページ目のアドレス空間内の1つのアドレス位置に記憶される。

【0093】以上の動作が信号 I_{m1} （又は I_{ms1} ）の所定周期分（例えば10周期以上）だけ高速に繰り返され、RAM808の1ページ目には参照信号 I_{ms1} の波形データが記憶され、2ページ目には計測信号 I_{m1} の波形データが記憶される。こうしてRAM808に記憶された1組の波形データは、マイクロプロセッサ等のアドレスバスABSからアドレスカウンタ810に設定されたアドレス値に応答して、マイクロプロセッサのデータバスDBSに読みだされる。そのマイクロプロセッサは図6に示した各検出回路56、58と同じ機能を達成するプログラムによって各波形データを処理し、位置ずれ量 ΔX_1 、 ΔX_2 、 ΔX_3 を求める。

【0094】以上のサンプリング回路80Aの構成、動作はサンプリング回路80B、80Cでも全く同じであり、回路80Bは計測信号 I_{m2} と参照信号 I_{ms2} との各波形データを一時的に記憶し、回路80Cは計測信号 I_{m3} と参照信号 I_{ms3} の各波形データを一時的に記憶する。この第4の実施例では計測信号 I_{mn} と参照信号 I_{msn} との夫々に対してA/Dコンバータを設けていないので、マイクロ秒オーダー内で同時にサンプリングすることは難しいが、現実問題として干渉ビームのピート周波数が数十KHz以下であれば、マイクロ秒オーダーの同時性は余り必要ではない。むしろA/Dコンバータ等の個数を半分にして回路構成を簡素化することによって信号処理回路のハードウェアコストを低減させた方が有利である。

【0095】ところでウエハステージWST上に既知の反射率のクロム表面をもったフィデューシャルマーク板FGを固定した場合は、先にも触れたようにそのマーク板FGを各種ベースライン量の計測やフォーカス状態の計測に利用することができる。ベースライン量とは、基本的には投影露光装置に装着されたマスク（レチクル）の中心の投影点と各種ウエハアライメント系の検出中心点との相対的な位置関係を決定するための計測動作を意味する。

【0096】図9は本発明の第5の実施例として、ベースライン量の計測が必要な投影露光装置の概略的なアライメント系の配置を示し、レチクルRはレチクルステージRST上に吸着され、そのレチクルRのパターン像は等倍、又は縮小の投影光学系PLを介してウエハW上の所定のショット領域に投影露光されるように構成されている。

【0097】図9において、ウエハステージWST上のフィデューシャルマーク板FGの表面には、スルーザレチクル（TTR）方式のアライメント系TTRAによって検出可能なマーク群と、レチクルアライメント系RAによって検出可能なマーク群と、スルーザレンズ（TTL）方式のアライメント系TTLAによって検出可能なマーク群と、そして投影光学系PLの外部に固定されたオフ・アクシス方式のアライメント系OFAによって検

出可能なマーク群とが形成されている。これらのマーク群は一部共通に使われるものもある。また各アライメント系 R A、T T R A、T T L A、O F A は、マーク検出時の基準となる直接的、または間接的な検出中心点 R f 1、R f 2、R f 3、R f 4 を備えている。

【0098】先の図4のような位置検出装置を各アライメント系に適用した場合、検出中心点 R f 1、R f 2、R f 3、R f 4 は参照格子 S G によって規定される。ただしレチクルアライメント系 R Aにおいて、レチクル R の周辺のレチクルアライメント用のマーク（格子パターン）R M とフィデューシャルマーク板 F G 上の対応した格子マークとを、パターン P R の投影露光用の照明光と同じ波長の照明光で照射し、両マークが所定の位置関係になるようにレチクルステージ R S T を微動させるような構成になっている場合は、検出中心点 R f 1 を必要としない。

【0099】このことはアライメント系 T T R A においても同様であって、フィデューシャルマーク板 F G 上の対応したマークあるいはウエハ W 上のマークと、レチクル R のパターン P R の周辺部に形成されたダイ・バイ・ダイ (D/D) アライメント用のマークとを画像として撮像し、両マーク像の位置ずれを検出する方式である場合は、格別に検出中心点 R f 2 を規定しておく必要もない。

【0100】ここで、ベースライン量とは、レチクル R の中心 C Cr のウエハ側への投影点（ほぼ光軸 A X 上に一致している）と、各検出中心点 R f 1、R f 2、R f 3、R f 4 のウエハ側への投影点との間の X、Y 方向の位置関係に他ならない。その位置関係は、フィデューシャルマーク板 F G の対応したマーク群と、各検出中心点 R f 1～R f 4 の投影点との位置ずれ量を各アライメント系 R A、T T R A、T T L A、O F A 自体で検出するとともに、そのときのウエハステージ W S T の座標位置をレーザ干渉計 4 4（図4参照）によって検出することで求めることができる。

【0101】そこで各アライメント系に図4のようなヘテロダイイン方式の位置検出装置が組み込まれているときは、そのようなベースライン計測動作時にフィデューシャルマーク板 F G の格子を検出することになるので、図4中の光電素子 3 6 A、3 6 B、3 6 C からの信号 I m 1、I m 2、I m 3 の各振幅レベル A 1、A 2、A 3 を図6中の回路ユニット 5 8 内に記憶しておくことができる。なお、図9に示した投影光学系 P L 内の瞳面 E P は、先の図1に示したフーリエ変換面 E P と同等のものである。そして投影光学系 P L を介してウエハステージ W S T 上の物体（ウエハ W のマーク、又はフィデューシャルマーク板 F G のマーク）を検出するアライメント系 R A、T T R A、T T L A の夫々に設けられた対物レンズの光軸は、ウエハステージ W S T 側では全て光軸 A X とほぼ平行になるように設定される。また、投影光学系 P L のウエハ側のみならずレチクル側もテレセントリック

系になっているとき（図9の場合）は、各アライメント系の対物レンズの光軸はレチクル側でも投影光学系 P L の光軸 A X と平行になっている。そして、それら対物レンズの光軸の延長は、投影光学系 P L の瞳面 E P の中央（光軸 A X が通る部分）を通ることになる。

【0102】その瞳面 E P の実効的な半径は、投影レンズ P L の解像力（最小解像線幅）を左右する開口数（N. A.）に対応し、現在 N. A. = 0.5～0.7 程度の投影レンズが開発されている。図10は、図9に示したアライメント系のうちアライメント系 T T L A の主要部の一例を示し、ウエハ上の格子マーク MG、又はフィデューシャルマーク板 F G を検出するための2本の送光ビーム士 L F（図4中のビーム + L F とビーム - L F に相当）は補正光学系 C G、ビームスプリッタ 2 0（図4中のハーフミラー 2 0 に相当）、対物レンズ O B J（図4中の対物レンズ 2 2 に相当）、2枚のミラー M R を介して投影レンズ P L に入射する。この際、2枚のミラー M R の間にはウエハ W の表面と共役な面 F C が形成され、この面 F C 内で2本のビーム士 L F は交差する。そのビーム士 L F は投影レンズ P L によってリレーされ、ウエハ上でも交差して格子マーク MG を照射する。

【0103】そして格子マーク MG からの干渉ビーム B M は、投影レンズ P L の瞳面 E P のほぼ中央を通り、ミラー M R、対物レンズ O B J、及びビームスプリッタ 2 0 を介してダイクロイックミラー D C M（図4中のダイクロイックミラー 3 2 に相当）に入射し、ここで波長分割される。仮に送光ビーム士 L F が2つの波長 $\lambda 1$ 、 $\lambda 2$ であるとすると、ダイクロイックミラー D C M は波長 $\lambda 1$ の干渉ビーム B m 1 を光電素子 3 6 A へ導き、波長 $\lambda 2$ の干渉ビーム B m 2 を光電素子 3 6 B へ導く。

【0104】このようなアライメント系 T T L A において、送光ビーム士 L F が複数の波長成分（互いに 30～40 nm 程度離れる）を含むと、投影レンズ P L の色収差（軸上と倍率）の影響、又は対物レンズ O B J の色収差の影響によって、ウエハ上に照射されるビーム士 L F の交差領域が各波長成分毎に Z 方向、あるいは X Y 方向に微妙にずれることがある。そこで図10のように送光ビーム士 L F の光路中に色収差に応じて発生する誤差を補正する補正光学系 C G を設ける。この補正光学系 C G は凸レンズ、凹レンズ、あるいはそれらの組み合せレンズ、または平行平板ガラス等で構成され、図4に示した調整光学系 1 4、1 6、1 8 を使用してもよい。

【0105】また、図9中のアライメント系 T T R A の場合、レチクル R 上の D/D アライメント用のマーク D DM を回折格子とし、そのマーク D DM と対応するウエハ W 上の格子マーク MG との相対位置ずれを、図4のようなヘテロダイイン方式で検出するときには、(G) 特開平 6-302504 号公報に開示されているように、投

影レンズPLの瞳面EPに透明な平行平板状の補正板PGPを設け、この補正板PGP上で送光ビーム(±LF)や干渉ビーム(BM)が通る位置のみに位相型回折格子(補正板PGPの表面に所定ピッチで凹凸のラインをエッティングしたもの)を配置して、軸上色収差と倍率色収差の影響を低減する必要がある。

【0106】図11は、アライメント系TTTRAの一部の構成と補正板PGPとの配置関係を示し、図11

(A)はX方向(計測方向)にピッチを有する格子マークMGを検出する場合の送光ビーム±LFと干渉ビームBMとの光路をX-Z平面でみたものであり、図11

(B)は、図11(A)の光路をそれと直交したY-Z平面でみたものである。

【0107】アライメント系TTTRAの対物レンズOBJ(図4の対物レンズ22に相当する)からは2本の送光ビーム±LFが光軸AXaからわずかに偏心して射出され、ミラーMRで反射してレチクルRのパターン領域の周辺の窓RWを介して投影レンズPLに入射する。2本の送光ビーム±LFは多波長化されており、X-Z平面内でみると図11(A)のように対称的な傾きで窓RWを透過し、Y-Z平面内でみると図11(B)のように、対物レンズOBJの光軸AXaに対して傾いて窓RWを透過する。

【0108】その2本の送光ビーム±LFは、それぞれ投影レンズPLの瞳面EPに配置された補正板PGP上の2ヶ所の位相型回折格子(以下、位相格子とする)PG1、PG2を通る。このとき位相格子PG1、PG2の作用によって送光ビーム±LFの夫々は同図中の破線から実線のように所定方向に所定量だけ傾きを変えられて投影レンズPLから射出する。そして送光ビーム±LFは、X-Z平面内でみると図11(A)のようにウエハW上の格子マークMGを対称的な入射角で照射し、Y-Z平面内では図11(B)のように格子マークMGに対してY方向に若干傾いて入射する。

【0109】これによって格子マークMGから発生した干渉ビームBMは再び投影レンズPLに入射し、瞳面EP上では位相格子PG1、PG2と異なる位置を通る。その位置には干渉ビームBMを図11(B)中の破線から実線のように所定方向に所定量だけ傾けるための位相格子PG3が形成され、それによって干渉ビームBMの光路は投影レンズPLを透過してレチクルRの窓RWへ向かうように補正される。そしてRWを通った干渉ビームBMはミラーMR、対物レンズOBJを介して図4のような受光系へ向かう。このとき干渉ビームBMは窓RWを、対物レンズOBJの光軸AXaに対してわずかに傾いて透過する。

【0110】このような補正板PGPを用いる場合、送光ビーム±LFが多波長化されていると、送光ビーム±LFの各波長成分毎に補正板PGP上でX方向にわずかにずれて位置する。このため、位相格子PG1、PG2

もそれに対応してX方向に大きめに形成されている。また、このような補正板PGPの使用は、図10に示したアライメント系TTLAに対しても当然に可能である。例えば石英やホタル石を屈折レンズの硝材とし、波長180~300nmの間の紫外線(エキシマレーザ光等)を露光光とするような投影レンズ(反射鏡と屈折レンズの組み合わせでもよい)を用いた露光装置の場合、He-Neレーザや半導体レーザからのビームの波長に対する色収差は極めて大きなものとなり、図10中に示したウエハ共役面FCは投影レンズから数十cm以上離れてしまう。そこで補正板PGPを使って、送光ビーム±LFが交差するウエハ共役面FCが投影レンズに近づくように補正するのである。

【0111】以上の如く、補正板PGP上の送光用位相格子PG1、PG2には多波長化されたビーム+LF、-LFが通るが、この際、位相格子PG1、PG2の格子構造を使用する波長成分の全てに対して最適化することは難しい。このため位相格子PG1、PG2の格子構造はある特定の波長成分で最適化されるように設定し、送光ビーム±LFの送光路(一般的には対物レンズOBJよりも光源側)中には、各波長成分毎の送光ビームが位相格子PG1、PG2で受ける回折作用の違いで生じる方向差分や位置差分だけを補償されるように、調整光学部材を設けておくのがよい。要するに、2本の送光ビーム±LFの干渉によってウエハW(又はフィデューシャルマーク板FG)の格子マークMG上に作られる干渉縞が波長成分毎に位置ずれやピッチずれを生じないように、図4中の調整光学系14、16、18、又は図10中の補正レンズCGを設け、これらを調整するのである。次に本発明の第6の実施例を以下に説明する。本実施例では図4に示した構成をベースとして、先の図20、図21で説明したように、格子マークからの±1次回折光の干渉ビームの他に、格子マークからの0次光と2次回折光の干渉ビームも検出する構成を付加した。0次光と2次回折光との干渉ビームを単一の光電素子で光電変換し、その光電信号を用いて格子マークの位置ずれを検出する方式は試みられているが、格子マーク照明用の送光ビームを多波長化した上で0次光と2次光の干渉ビーム(多波長化されている)を単一の光電素子で受光すると、そのままでは良好な位置ずれ検出が難しかった。その大きな理由は、図12に示すように0次光と2次光の干渉ビームを例えば3つの波長成分 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 毎に光電検出して得られた光電信号IK021、IK022、IK023の波形を観察すると容易に理解できる。すなわち、3つの光電信号IK02n(n=1、2、3)の相互の位相差が、±1次回折光の干渉ビームの場合の光電信号IKmn(図7参照)の位相差に比べて総じて大きくなるためである。このため、元来大きな位相差をもつ各波長毎の光強度の変化を単一の光電素子で受光してしまうと、各波長の強度の相殺効果によって光電

信号の振幅（交流の振幅分）が極めて小さくなってしまうのである。尚、0次光と2次光の干渉ビームは、先の図20で説明したように1次回折光±D1nの干渉ビームBMの両側に対称的な角度で発生する。

【0112】ところで図12（A）、（B）、（C）は、図20に示された0次-2次光の干渉ビームのうち、例え±1次光の干渉ビームBMの左側に現れる干渉ビームを3つの波長λ1、λ2、λ3毎に個別に光電検出したときの各光電信号IK021、IK022、IK023のヘテロダイイン方式での波形を表し、図12（D）は図7（D）と同じ参照信号となる光電信号ImSの波形を表す。

【0113】一方、図13（A）、（B）、（C）は、図20に示された0次-2次光の干渉ビームのうち、±1次光の干渉ビームBMの右側に現れる干渉ビームを3つの波長λ1、λ2、λ3毎に個別に光電検出したときの各光電信号IK201、IK202、IK203のヘテロダイイン方式での波形を表し、図13（D）は図12（D）と同じ光電信号ImSの波形を表す。以上の図12（A）、（B）、（C）と図13（A）、（B）、（C）に示すように、各信号IK02n、IK20n（n=1、2、3）の位相ずれ△β01、△β02、△β03、△β21、△β22、△β23は波長依存性が強く、大きくばらつくとともに、同一波長についても信号IK02nとIK20nとで逆方向の傾向をもつ。

【0114】そこで本実施例の構成を図14を参照して説明する。図14は図4の構成の一部、具体的には格子マークMGからの各種干渉ビームの光電検出系を変更したものであり、従って図4中の部材と同じ機能の部材には同一の符号を付けてある。図14中の送光系100は、図4に示した光源LS1、LS2、LS3、ミラーMR、ダイクロイックミラーDCM4、DCM5、周波数シフターとしてのラジアル格子板RRG、レンズ10、空間フィルター12、及び調整光学系14、16、18等で構成され、1対の送光ビーム+LF、-LFを射出する。波長λ1、λ2、λ3の各成分を含む送光ビーム±LFは、ハーフミラー20で一部が反射されて対物レンズ22に入射し、一部は参照光受光系110に入射する。参照光受光系110は図4中の波長選択フィルター24、レンズ26、参照格子SG、及び空間フィルター38で構成され、参照光BmSを光電素子40へ導く。

【0115】さて、対物レンズ22を介してウエハW上の格子MGが送光ビーム±LFによって照射されると、±1次回折光の干渉ビームBMが垂直に発生するとともに、各送光ビームの進行方向と逆方向に0次-2次光の各種干渉ビームが発生する。その0次-2次光の干渉ビームは対物レンズ22、ハーフミラー20を介してダイクロイックミラー32、34に向かい、ここで各波長成分毎に分離される。まずダイクロイックミラー32では

波長λ1の0次-2次光の干渉ビーム（2つ）がほとんど反射され、その干渉ビームはそれぞれ36A1、36A2で受光される。もちろん、波長λ1の±1次光の干渉ビームBm1はダイクロイックミラー32で反射されて光電素子36Aで受光される。

【0116】またダイクロイックミラー32を透過した波長λ2、λ3の0次-2次光の干渉ビームと±1次光の干渉ビームBm2、Bm3とは、ダイクロイックミラー34で波長成分毎に分離され、波長λ2の0次-2次光の干渉ビーム（2つ）はそれぞれ光電素子36B1、36B2で受光され、±1次光の干渉ビームBm2は光電素子36Bで受光される。さらにダイクロイックミラー34を透過した波長λ3の0次-2次光の干渉ビーム（2つ）は光電素子36C1、36C2で受光され、±1次光の干渉ビームBm3は光電素子36Cで受光される。

【0117】以上の構成から明らかのように、本実施例では光電素子40からの光電信号ImSを参照信号として、各光電素子36A、36A1、36A2、36B、36B1、36B2、36C、36C1、36C2からの光電信号の位相差を求める信号処理回路が必要となる。そのため最も簡便な回路構成の一例を図15に示す。図15は、先の図6に示された処理回路の一部を改良したものであり、ハードウェア上では図6中のA/Dコンバータ回路50に入力する参照信号ImS以外の各光電信号を時系列的に選択するアナログマルチプレクサ120を付加したことが異なる。このアナログマルチプレクサ120は3入力1出力の切り替えスイッチSS1、SS2、SS3を含み、各スイッチSS1、SS2、SS3は外部切り替え信号SNに応答して連動して切り替えられる。

【0118】スイッチSS1は、波長λ1の干渉ビームを受光して得られる3つの光電信号Im1、IK021、IK201のうちの1つを選択し、スイッチSS2は波長λ2の干渉ビームを受光して得られる3つ光電信号Im2、IK022、IK202のうち1つを選択し、スイッチSS3は波長λ3の干渉ビームを受光して得られる3つの光電信号Im3、IK023、IK203のうちの1つを選択するように接続される。ただし本実施例では、スイッチSS1～SS3を連動しておくので、同時にA/Dコンバータ回路50に入力される3つの計測信号（光電信号）は、同じ回折状態のもとで検出された信号とする。すなわち、スイッチSS1～SS3を中間位置に切り換えると、先の図6の状態と全く同じになって、±1次光の干渉ビームBMを各波長成分毎に光電検出した信号Im1～Im3がA/Dコンバータ回路50に供給され、3つのスイッチSS1～SS3を図15の図示の位置に切り換えると、±1次光の干渉ビームBMの左側に発生した0次-2次光の干渉ビームを各波長毎に光電検出した信号IK021、IK022、IK023がA/Dコンバータ回路50に供給される。もちろん3つ

のスイッチSS1～SS3が最も右側の位置に切り換えると、光電信号IK201、IK202、IK203がA/Dコンバータ回路50に供給される。

【0119】さらに図6で示した振幅検出、振幅比検出の回路58は、図15では回折状態の異なる干渉ビーム毎にグループ化された比のデータCn1、Cn2、Cn3(nは波長に対応してn=1、2、3)を出力するように変更される。この比のデータのうちCn1(n=1、2、3)は図6中の比C1、C2、C3と同じものであり、Cn2(n=1、2、3)は光電信号IK02n(n=1、2、3)から得られた各波長毎の比であり、Cn3(n=1、2、3)は光電信号IK20n(n=1、2、3)から得られた各波長毎の比である。

【0120】また、図6で示した位相差、位置ずれ検出回路56は、図15では回折状態の異なる干渉ビーム毎にグループ化されたずれ量 ΔX_{n1} 、 ΔX_{n2} 、 ΔX_{n3} (n=1、2、3)を出力するように変更される。このずれ量のうち ΔX_{n1} (n=1、2、3)は図6中のずれ量 ΔX_1 、 ΔX_2 、 ΔX_3 と同じものであり、 ΔX_{n2} (n=1、2、3)は光電信号IK02n(n=1、2、3)から求められた各波長成分毎のずれ量であり、 ΔX_{n3} (n=1、2、3)は光電信号IK20n(n=1、2、3)から得られた各波長成分毎のずれ量である。なお、この検出回路56は先の図12、13で説明したような位相差 $\Delta\beta_0n$ 、 $\Delta\beta_{2n}$ (n=1、2、3)に応じた値を中間に算出している。

【0121】さらに図6中の加重平均化回路60は、図15では選択的な加重平均化回路に変更され、±1次光の干渉ビームBMの光電検出結果のみに基づいて最終的な位置ずれ量を ΔX を算出する図6と同じ第1の演算モード、0次-2次光の干渉ビームの光電検出結果のみに基づいて最終的なずれ量 ΔX を算出する第2の演算モード、及び全ての干渉ビーム光電検出結果に基づいて最終的なずれ量 ΔX を算出する第3の演算モードを備えている。これら3つの演算モードはオペレータによって適宜選択可能であるが、第3の演算モードを指定したときは、さらに2～3の演算アルゴリズムを選ぶことができる。このようなモード指定、アルゴリズム選択については後で詳しく述べる。

【0122】さて、本実施例の場合も、まず初めにウェーハステージWST上のフィデューシャルマーク板FGの格子マークが、対物レンズ22からの送光ビーム±LFで照射されるようにステージWSTの位置決めが行われる。そして切り換え信号SNをアナログマルチプレクサ120に与えて、スイッチSS1～SS3を例えば図15に示した位置に設定し、フィデューシャルマーク板FGの格子マークから発生した0次-2次光の干渉ビームを光電検出して得られた光電信号のうちの信号IK02n(n=1、2、3)をA/Dコンバータ回路50でデジタルサンプリングし、その信号IK02nの各波形を

メモリ回路54内に一時的に記憶する。

【0123】そして振幅検出回路58によってメモリ回路54内の波形データを解析して、各信号IK02nの振幅値(ピークtoピーク)をJ02n(n=1、2、3)として算出して記憶する。次にスイッチSS1～SS3を図15中の最も右側に切り換えて、フィデューシャルマーク板FGの格子マークから発生した0次-2次光の干渉ビームを光電検出して得られる光電信号のうちの信号IK20n(n=1、2、3)をA/Dコンバータ回路50でデジタルサンプリングし、その信号IK20nの各波形をメモリ回路54に一時的に記憶する。この際、メモリ回路54の記憶容量が十分に大きくなき場合は、先に記憶した信号IK02nの各波形データを消去して信号IK20nの各波形データを上書きする。その後、振幅検出回路58によってメモリ回路54内の波形データを解析して、各信号IK20n(n=1、2、3)の振幅値(ピークtoピーク)をJ20n(n=1、2、3)として算出して記憶する。

【0124】最後に、スイッチSS1～SS2を中間位置に切り換えて、フィデューシャルマーク板FGの格子マークから発生した±1次光の干渉ビームを光電検出して得られる信号Imn(n=1、2、3)の各波形データを同様にメモリ回路54に記憶し、振幅検出回路58によって各信号Imnの振幅値J11n(n=1、2、3)を求めて記憶する。

【0125】以上によって予備動作が終了するので、次に実際に位置決め、位置合わせすべきウェーハWをステージWST上に載置し、ウェーハW上の格子マークMGが対物レンズ22からの送光ビーム±LFによって照射されるようにステージWSTを位置決めする。そして、先のフィデューシャルマーク板FGの格子マークの検出時と同様にして、マルチプレクサ120のスイッチSS1～SS3を順次切り換えては各信号の波形データをメモリ回路54に取り込み、ウェーハ上の格子マークMGから発生した各干渉ビームを光電検出して得られる信号Imn、IK02n、IK20n(n=1、2、3)の各振幅値を検出回路58によって、それぞれEn(図7参照)、E02n、E20n(図12、13参照)として算出する。

【0126】また、スイッチSS1～SS3を切り換えてメモリ回路54に信号Imn、IK02n、IK20nのうちの1組を記憶させる際、参照信号ImSの波形も同じ時間軸のものとメモリ回路54に記憶する。そしてスイッチSS1～SS3を切り換える前に、位相差、位相ずれ検出回路56によって、信号Imn、IK02n、IK20nのうちの記憶した信号の波形データを解析し、位相 $\Delta\phi_n$ 、 $\Delta\beta_0n$ 、 $\Delta\beta_{2n}$ のうちの対応した1つと、位置ずれ量 ΔX_{n1} 、 ΔX_{n2} 、 ΔX_{n3} (n=1、2、3)のうちの対応した1つとを順次算出しておく。

【0127】こうして、各波長毎の振幅値や位置ずれ量

が回折状態の異なる検出光（干渉ビーム）ごとに求まる、振幅比検出回路 5.8 は以下の演算を行う。

【0128】

【数1】

$$\left\{ \begin{array}{l} C11=E1/J111 \\ C21=E2/J112 \\ C31=E3/J113 \end{array} \right.$$

【0129】

【数2】

$$\left\{ \begin{array}{l} C12=E021/J021 \\ C22=E022/J022 \\ C32=E023/J023 \end{array} \right.$$

【0130】

【数3】

$$\left\{ \begin{array}{l} C13=E201/J201 \\ C23=E202/J202 \\ C33=E203/J203 \end{array} \right.$$

次に平均化回路 6.0 によって最も確からしいずれ量 ΔX が算出されるが、 ± 1 次光の干渉ビーム BM のみを使った第 1 の演算モードでは、先の図 6 の場合と同様であり、

$$\Delta X = (C11 \cdot \Delta X11 + C21 \cdot \Delta X21 + C31 \cdot \Delta X31) / (C11 + C21 + C31)$$

によって算出される。

【0131】一方、0 次 - 2 次光の干渉ビームのみを使

$$\Delta X = (CA1 \cdot \Delta XA1 + CA2 \cdot \Delta XA2 + CA3 \cdot \Delta XA3) / (CA1 + CA2 + CA3)$$

以上により、第 2 の演算モードによる格子マーク MG の位置又は位置ずれ検出が達成される。また第 3 の演算モードでは、第 1 の演算モードで算出された位置ずれ量と第 2 の演算モードで算出された位置ずれ量とを単純平均する第 1 のアルゴリズムと、それら 2 つの位置ずれ量を加重平均する第 2 のアルゴリズムとのいずれか一方を、オペレータによって予め設定可能となっている。そこで第 1 の演算モード（ ± 1 次光の干渉ビームの検出結果を使うモード）で最終的に算出された位置ずれ量を $\Delta XM1$ とし、第 2 の演算モードで最終的に算出された位置ずれ量を $\Delta XM2$ とすると、第 1 のアルゴリズムで決定される位置ずれ量は $(\Delta XM1 + \Delta XM2) / 2$ で算出される。

【0135】一方、第 2 のアルゴリズムでは、第 1 の演算モードで算出されるずれ量 $\Delta XM1$ と第 2 の演算モードで算出される $\Delta XM2$ とを、所定の重み係数 $Q1$ 、 $Q2$ を使って加重平均する。一例として、重み係数 $Q1$

が回折状態の異なる検出光（干渉ビーム）ごとに求まる、振幅比検出回路 5.8 は以下の演算を行う。

【0132】そこで本実施例ではそのアルゴリズムをベースとして、平均化回路 6.0 はまず信号 $IK02n$ から求められた各位置ずれ量 $\Delta Xn2$ ($n = 1, 2, 3$) と信号 $IK20n$ から求められた各位置ずれ量 $\Delta Xn3$ ($n = 1, 2, 3$) との各波長毎の平均値 ΔXAn ($n = 1, 2, 3$) を以下のように算出する。

$$\Delta XA1 = (\Delta X12 + \Delta X13) / 2$$

$$\Delta XA2 = (\Delta X22 + \Delta X23) / 2$$

$$\Delta XA3 = (\Delta X32 + \Delta X33) / 2$$

さらに平均化回路 6.0 は、振幅比検出回路 5.8 で求められた 0 次 - 2 次光の干渉ビームの振幅比 $Cn2$ 、 $Cn3$ の各波長成分毎の平均値 CA_n ($n = 1, 2, 3$) を以下のように算出する。

$$CA1 = (C12 + C13) / 2$$

$$CA2 = (C22 + C23) / 2$$

$$CA3 = (C32 + C33) / 2$$

その後、平均化回路 6.0 は、各波長成分毎の平均的な比 CA_n を重み係数として、各波長成分毎の平均的な位置ずれ量 ΔXAn を以下のように加重平均して、最も確からしいずれ量 ΔX を算出する。

【0134】

$$\Delta X = (CA1 \cdot \Delta XA1 + CA2 \cdot \Delta XA2 + CA3 \cdot \Delta XA3) / (CA1 + CA2 + CA3)$$

は、 ± 1 次光の干渉ビーム BM を光電検出して得られた信号 Imn ($n = 1, 2, 3$) の夫々の振幅値 $E1$ 、 $E2$ 、 $E3$ (図 7 参照) の和に対応させ、重み係数 $Q2$ は 0 次 - 2 次光の干渉ビームを光電検出して得られた信号 $IK02n$ 、 $IK20n$ ($n = 1, 2, 3$) の各波長毎の平均振幅値 $(E021 + E201) / 2$ 、 $(E022 + E202) / 2$ 、 $(E023 + E203) / 2$ の和に対応させる。従って、第 2 のアルゴリズムは以下の演算により格子マーク MG のずれ量 ΔX が決定される。

$$【0136】 \Delta X = (Q1 \cdot \Delta XM1 + Q2 \cdot \Delta XM2) / (Q1 + Q2)$$

なお、原理的に言って高次の回折光ほど、その光強度が小さいので、 ± 1 次光の干渉ビーム BM の光強度振幅 (E_n に対応) にくらべて 0 次 - 2 次光の干渉ビームの光強度振幅 ($E02n$ 、 $E20n$ に対応) はかなり小さくなる。従って単純に信号 Imn 、 $IK02n$ 、 $IK20n$ の振幅のみの和で重み係数 $Q1$ 、 $Q2$ を決定してしま

うと、ほとんどの場合重み係数Q1の方が係数Q2よりも大きくなってしまう。そこで係数Q2のほうは算出された値を、例えば予め定めた割合（一例として10～30%）だけ増大させるように補正しておくのがよい。

【0137】次に本発明の第7の実施例を図16を参照して説明する。この実施例では、先の図4中に示したウエハステージWST上のフィデューシャルマーク板FGの構造を透過型の格子（振幅透過率に非対称性がない格子）に変更し、その格子から透過して発生する干渉ビームを光電検出することによって、各光電信号Imn、IK02n、IK20nの振幅比を検出回路58で算出する際に使う分母（基準値）を求めるようにした。

【0138】図16はウエハステージWSTの部分断面を表し、送光ビーム±LF（ここでは波長λ1、λ2の2波長とする）がフィデューシャルマーク板FG上の格子を照射すると、その格子からステージ内部に向けて0次光、±1次光、±2次光が発生する。これらの回折光はミラーMRで直角に曲げられてフーリエ変換機能を有するレンズ系G5に入射し、自動変換機能を有する波長選択フィルタ24で波長λ1とλ2のいずれか一方の成分が選択され、それぞれ干渉ビームBmrn、±B1r、±B2rとなって光電素子群DTRに入射する。波長選択フィルタ24は、波長λ1を透過して波長λ2を遮断するフィルタと、その逆の特性を持つフィルタとを逐一的に光路に挿脱できるように構成される。従って、波長λ1を選択するフィルタが使われるときは、波長λ1による0次～2次光の干渉ビーム±B1rと波長λ1による±1次光の干渉ビームBmr1とが光電素子群DTRに達し、波長λ2を選択するフィルタが使われるときは、波長λ2による0次～2次光の干渉ビーム±B1rと波長λ2による±1次光の干渉ビームBmr2とが光電素子群DTRに達する。このため波長λ1選択用フィルタの使用時には光電信号Imr1、光電信号IR021、IR201が得られ、波長λ2選択用フィルタの使用時には光電信号Imr2、光電信号IR022、IR202が得られる。

【0139】ヘテロダイイン方式の場合、これらの光電信号はビート周波数と等しい周波数の正弦波状の波形となって現れ、先の図15に示した処理回路のアナログマルチプレクサ120の3つのスイッチSS1～SS3によって選択的にA/Dコンバータ50へ入力されるよう接続される。具体的には図15中の3つのスイッチSS1～SS3を5入力1出力のものに変更し、そのうち2入力分をフィデューシャルマーク板FGの検出時に得られる光電信号Imr1、IR021、IR201の組と光電信号Imr2、IR022、IR202の組との入力切換に使用する。

【0140】これらの光電信号の各振幅値は図15中の振幅検出回路58で求められ、記憶される。そして振幅比を求める際には、例えば以下の演算を行う。

$$C11 = Im1 / Imr1$$

$$C21 = Im2 / Imr2$$

$$C12 = IK021 / IR021$$

$$C22 = IK022 / IR022$$

$$C13 = IK201 / IR201$$

$$C23 = IK202 / IR202$$

このように本実施例ではフィデューシャルマーク板を透過した回折光の干渉ビームを光電素子群DTRで光電検出するようにしたので、その素子群DTRから得られる各光電信号の位相情報と参照信号としての光電信号Imsの位相情報を比べると、フィデューシャルマーク板FGの位置ずれ、又は位置の計測、すなわちベースライン計測の一部分の動作を兼用させることができる。

【0141】次に本発明の第8の実施例を図17を参照して説明する。本実施例では、対物レンズ22を介してウエハW（又はフィデューシャルマーク板FG）上の計測用（アライメント用）の格子マークMGを照射する1対の送光ビーム+LFと-LFとの偏光方向を相補的な関係にする。すなわち直線偏光であれば送光ビーム+LFと-LFとの偏光方向を直交させ、円偏光であれば送光ビーム+LFと-LFとを互いに逆回りの偏光に設定する。このため2つの送光ビーム±LFは互いに干渉することなく、格子マークMGから垂直に発生する各波長λ1、λ2、λ3の±1次回折光BMも互いに干渉しない。

【0142】そのため、±1次回折光BMを対物レンズ22、小ミラーMR2を介して光電検出する際、検光子（アナライザ）としての偏光ビームスプリッタPBSを用いる。このようにすると、偏光ビームスプリッタPBSを透過した±1次回折光BMは互いに干渉して第1の干渉ビームBP1となり、偏光ビームスプリッタPBSで反射された±1次回折光BMは互いに干渉して第2の干渉ビームBP2となる。これら干渉ビームBP1、BP2は互いに相補的ではあるが、それぞれの干渉ビームはヘテロダイイン方式であればビート周波数に応じて正弦波状に強度変調されたものとなる。さらに干渉ビームBP1とBP2の強度変調の位相は丁度180度だけ異なったものとなっている。

【0143】尚、同図中に示した1/2波長板HWは、送光ビーム±LFと±1次回折光BMの互いに直交する直線偏光方向が、偏光ビームスプリッタPBSの偏光分離方向と異なる（回転している）場合に、±1次回折光BM間の直線偏光方向を修正する目的で設けられたものである。このため、±1次回折光BMの間の互いに直交した直線偏光方向が最初から偏光ビームスプリッタPBSの偏光分離方向と一致しているか、あるいは送光ビーム+LF、-LFが逆回りの円偏光になっているときは1/2波長板HWを用いなくてもよい。

【0144】そこで本実施例では、干渉ビームBP1をダイクロイックミラー332、334を介して各波長毎に弁別し、干渉ビームBP1の波長λ1の成分を光電素子

36A1で受光し、波長 λ_2 の成分を光電素子36B1で受光し、波長 λ_3 の成分を光電素子36C1で受光する。同様に干渉ビームB P2についてもダイクロイックミラー32、34で波長弁別し、波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 の各成分毎に光電素子36A2、36B2、36C2で受光する。

【0145】さらに光電素子36A1と36A2の両出力信号は、差動アンプによって減算されて光電信号 I_{m1} となり、光電素子36B1と36B2の両出力信号は差動アンプによって減算されて光電信号 I_{m2} となり、そして光電信号36C1と36C2の両出力信号は差動アンプによって減算されて光電信号 I_{m3} となる。このように差動アンプを用いたのは、例えば光電素子36A1の出力信号と光電素子36A2の出力信号とが互いに逆位相(180°の差)になっているからであり、両出力に共通に含まれる同相ノイズ成分が減算によってキャンセルされ、信号 I_{m1} の実質的なS/N比が改善されることになる。なお、先の図4、14、17に示した対物レンズ22は、使用する波長域($\lambda_1 \sim \lambda_3$)において発生する各種の色収差のうち、少なくとも軸上色収差についてある程度補正されているのが望ましい。仮に使用する波長 $\lambda_1 \sim \lambda_3$ の帯域が100nm以下であれば、そのような軸上の色収差は対物レンズ22を構成する複数のレンズ素子の硝材を選択したり、異なる屈折率、分散比のレンズ素子を組み合わせることによってある程度補正可能である。もちろん、そのような色収差は対物レンズ22で完全に補正しておく必要もなく、図4に示した調整光学系14、16、18により補正することも可能である。

【0146】以上、本発明の各実施例を説明したが、ウェハWやフィデューシャルマーク板FG上の格子マークMGをホモダイン方式で検出する場合、その格子マークMGをピッチ方向にプリスキャンして各光電信号のレベル変化をサンプリングする必要がある。その場合、最も簡単な手法は、図6又は図15に示した信号波形サンプリング用のクロック信号Cpsを、ステージWSTの位置計測用のレーザ干渉計44からの計測パルス(例えば0.02μm毎に1パルス)に変更することである。このようにすると、格子マークMGを数ピッチ分に渡ってプリスキャンする間に発生する各光電信号の波形データが格子マークMGの格子位置に対応してメモリ回路54に記憶されることになる。

【0147】また、格子マークMGに2つの送光ビーム $\pm L F$ を照射する方式では、その2つの送光ビーム $\pm L F$ は格子マークMGの少なくともピッチ方向に関して対称的な入射角にするのが望ましく、また先の図3のように格子マークMGに1つの送光ビームを投射する方式では、その入射角は格子マークMGのピッチ方向に関して零(垂直入射)にするのが望ましい。

【0148】さらに本発明の各実施例では、多波長化し

た送光ビームを同時に格子マークMGへ照射するようにしたが、先の図4中の各光源LS1、LS2、LS3の後に高速シャッターを設け、波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 の各送光ビームのいずれか1つを時系列的に切り換えて射出させるようにもよい。この場合、受光系のいくつかの光電素子は波長毎に予め分離して用意することなく共通のものにすることができる。このように、各波長成分毎に時系列的に送光ビームを射出するようにすると、装置上高速シャッター機構は設けなければならないが、光電素子の数や信号処理回路内の部品点数(特にA/Dコンバータやメモリチップの数)を大幅に少なくすることができるばかりでなく、図16中に示したステージWST内の波長選択フィルタ24も省略できる。

【0149】ところで、多波長化された照明光束を計測用の格子マークMG(またはフィデューシャルマーク)に投射する際、図1、3、4のように各波長毎の複数のレーザビームを一度同軸に合成せずに、格子マークMGのフーリエ変換面において、マーク位置の計測方向(ピッチ方向)と直交した非計測方向に分離して送光するよう構成してもよい。すなわち複数の照明ビームの波長毎に格子マークMGへの入射角を非計測方向に異ならせることもできる。

【0150】図22は投影レンズの後群レンズ系G2または対物レンズ22に入射する2つの波長のビーム $\pm L F \lambda_1$ 、 $\pm L F \lambda_2$ の送光の様子を示し、それらビーム $\pm L F \lambda_1$ 、 $\pm L F \lambda_2$ は格子マークMGに対するフーリエ変換面(鏡面)EP上で光軸AXから偏心した位置を通る。また各ビーム $\pm L F \lambda_1$ 、 $\pm L F \lambda_2$ は同図中の紙面と垂直な方向に分離した2本のビームで構成される。さらに同図中の格子マークMGのピッチ方向も紙面と垂直な方向であり、波長 λ_1 のビーム $\pm L F \lambda_1$ と波長 λ_2 のビーム $\pm L F \lambda_2$ とをフーリエ変換面EP上で非計測方向(同図の紙面内の左右方向)にずらしておく。

【0151】これによって格子マークMGから発生してフーリエ変換面EPまで戻ってくる ± 1 次回折光の干渉ビームBm1、Bm2も、波長毎にフーリエ変換面EP上で非計測方向に分離した位置を通る。干渉ビームBm1は送光ビーム $\pm L F \lambda_1$ の照射によりマークMGから発生したものであり、干渉ビームBm2は送光ビーム $\pm L F \lambda_2$ の照射によりマークMGから発生したものであり、それら送光ビームと干渉ビームとはフーリエ変換面EP上では、例えば図23のように分布する。

【0152】図23において、フーリエ変換面EPの中心を原点とする直交軸(計測軸と非計測軸)を設定したとき、2組の送光ビーム $\pm L F \lambda_1$ 、 $\pm L F \lambda_2$ の非計測軸の方向のずれ量Dhは、1次回折光による干渉ビームBm1、Bm2の非計測方向のずれ量に対応したものとなる。このように、格子マークMGを照射するビームを各波長成分毎に非計測方向に傾けておくと、干渉ビームB

m1, Bm2もフーリエ変換面E P内で分離して分布することになるので、各光電検出器の受光面をフーリエ変換面E P上またはその面E Pと共に面上に配置するだけで、同様に光電検出が可能となる。

【0153】すなわち、光電検出すべき複数の干渉ビーム（±1次回折光の干渉、0-2次回折光の干渉）が各波長毎にフーリエ変換面E P上で分離していれば、それらは先の各実施例のようなダイクロイックミラーを用いなくとも個別に光電検出可能である。従って検出すべき干渉ビームを各波長毎に分離する手法として、ダイクロイックミラー、バンドパスフィルター等の波長選択素子を用いることは必ずしも必須のことではない。

【0154】また、送光ビームの多波長化はレーザ光源に限らず、ハロゲンランプからの光、高輝度LEDからの光を利用しても実現できる。ハロゲンランプからの光を利用するときは、所定のバンド幅を有する波長選択フィルタを設け、このフィルタで選択された20~100nm程度の波長幅の光（ブロードバンド光）を、例えば光ファイバー等で導光して使うことになる。この場合、ウェハ上の格子マークMGを照射する送光ビームは、選択された波長バンド幅内で連続した強度分布を有するため、受光系内の各光電素子の前に特定の波長成分のみを取り出す干渉フィルタ（バンド幅は3~10nm）を固定的または交換可能に配置してもよい。

【0155】

【発明の効果】以上、本発明によれば位置検出用の照明光を多波長化、又はブロードバンド化し、基板上の位置検出用の格子状マークから発生する回折光を波長成分毎に独立して光電検出し、それによって得られる各光電信号毎にマーク位置情報を検出して計算上で平均化するようとしたので、マークの非対称性やレジスト層の厚みむらによる影響を低減させた高精度な位置検出が可能となる。また、マークからの回折光を光電検出する際に、波長成分毎に独立した光電信号を得るようにしたので、照明光の各波長成分毎の強度が異なっていても、従来のように多波長化による平均化効果を損なうことがないといった利点もある。

【0156】さらに本発明によれば、光電検出すべき回折光がより高次の成分からなる場合であっても、従来のように单一の光電素子で多波長化された高次回折光（0次、2次光の干渉ビーム等）を同時に受光する際に生じる相殺現象がなくなり、従来に比べて各段に高精度な位置検出、アライメントが可能となる。しかも本発明では、光電検出された各波長成分毎の回折光の強度レベルの減衰率（振幅比）を求め、その減衰率が小さく信号振幅が相対的に大きくなっている回折光に対しては、大きな重みを加えた平均化演算により位置検出を行うようにしたので、単純な平均化に比べて格段に位置検出の精度が高いといった効果も得られる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施例による位置検出装置の構成を示す図

【図2】干渉縞と格子との相対的な位置関係の変化と検出信号のレベル変化を表す図

【図3】本発明の第2の実施例による位置検出装置の構成を示す図

【図4】本発明の第3の実施例による位置検出装置の構成を示す図

【図5】回転ラジアル格子板による回折ビームの発生の様子を示す斜視図

【図6】第3の実施例による装置に適用される信号処理回路を示すブロック図

【図7】図6の処理回路のメモリ中に取り込まれる各信号の波形の一例を示す図

【図8】図4に示された装置に適用される信号処理回路の変形例を第4の実施例として示すブロック図

【図9】本発明が適用し得る投影露光装置の概略構成を第5の実施例として示す図

【図10】図9に示した装置のTTLアライメント系の部分拡大図

【図11】図9に示した装置の変形例を説明する図

【図12】回折格子からの0次光と2次光との各干渉により得られた各波長毎の光電信号の波形の一例を示す図

【図13】回折格子からの0次光と2次光との各干渉により得られた各波長毎の光電信号の波形の一例を示す図

【図14】本発明の第6の実施例による位置検出装置の構成を示す図

【図15】図14の装置に適用される信号処理回路の構成を示すブロック図

【図16】本発明の第7の実施例による装置の部分構成を示す断面図

【図17】本発明の第8の実施例による位置検出装置の構成を示す図

【図18】格子マークとレジスト層の構造の一例を示す断面図

【図19】図18の格子マークを検出したときの検出誤差と信号変化の振幅分との関係をシミュレーションしたグラフ

【図20】複数の波長の光の照射によって格子マークから発生する各次回折光の様子を示す図

【図21】1次回折光を使って図18のような構造のマークを検出したときの検出誤差と、0次-2次回折光を使ってマークを検出したときの検出誤差とをシミュレーションしたグラフ

【図22】本発明の各実施例で示された照明ビームの投射方式の変形例を示す図

【図23】図22の照明ビームの投射方式の際のフーリエ変換面上での各ビームの配置例を示す図

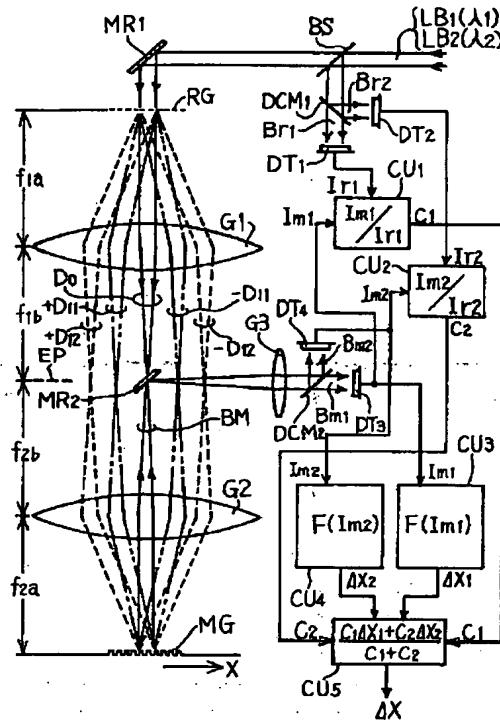
【符号の説明】

R G . . . 基準格子

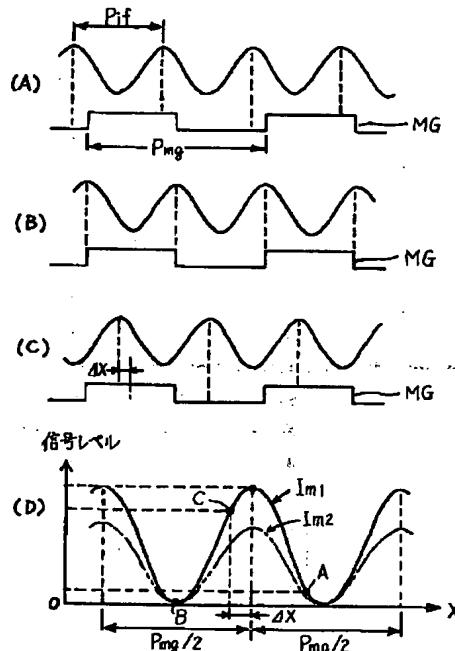
MG . . . 格子マーク
G 1 . . . 投影レンズの前群レンズ系
G 2 . . . 投影レンズの後群レンズ系
L S1 、 L S2 、 L S3 . . . レーザ光源
R R G . . . 回転ラジアル格子板（周波数シフター）
W . . . ウエハ

FG . . . フィデューシャルマーク板
DT1、DT2、DT3、DT4 . . . 光電素子
22 . . . 対物レンズ
36A、36B、36C . . . 光電素子
CU5、60 . . . 加重平均化回路

【図1】

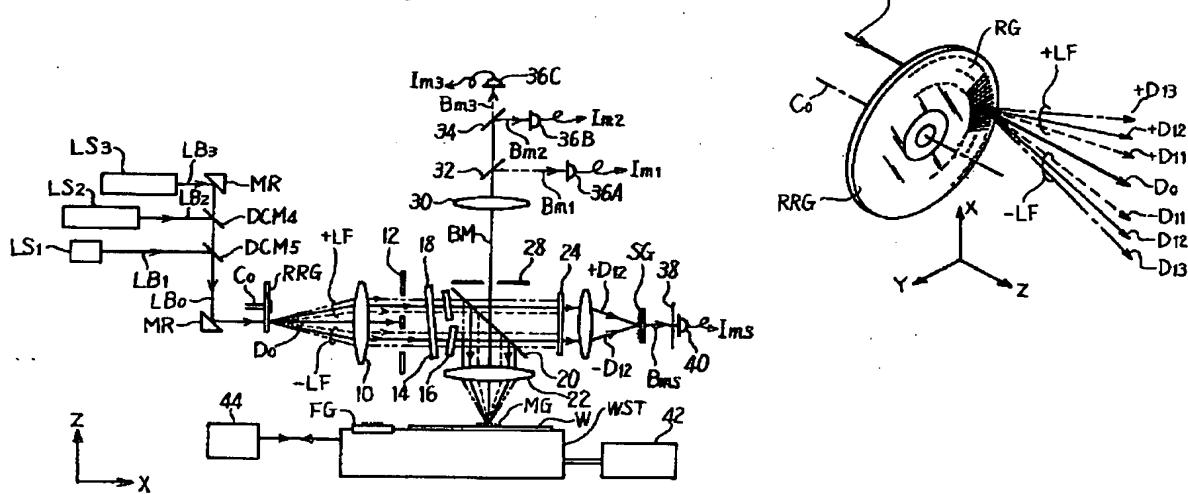


【図2】

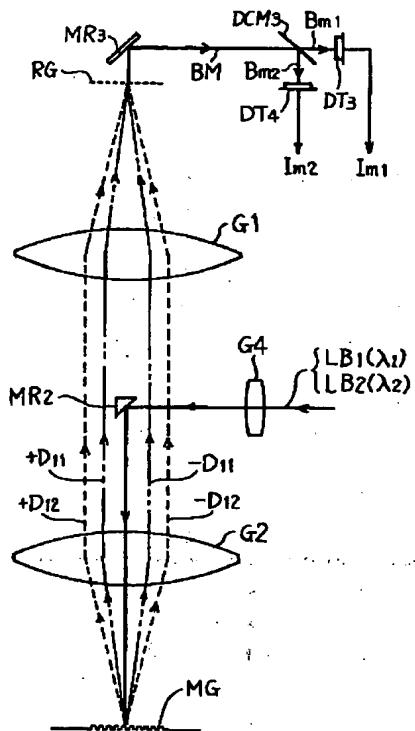


【 5】

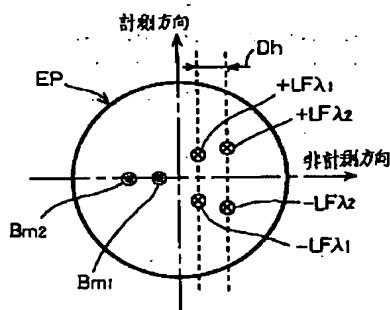
【图4】



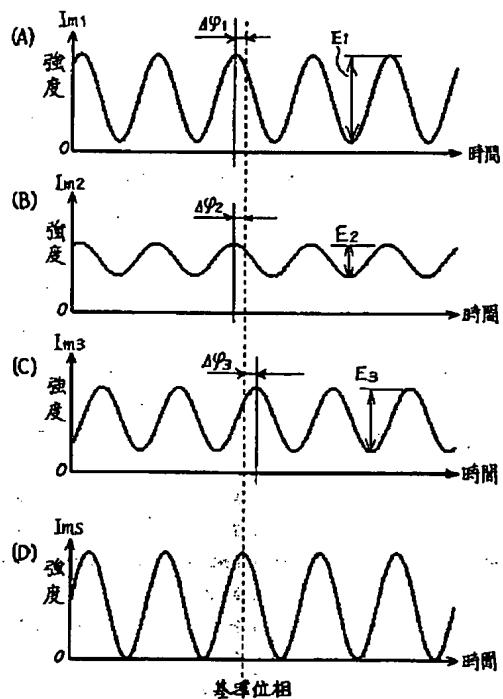
【図3】



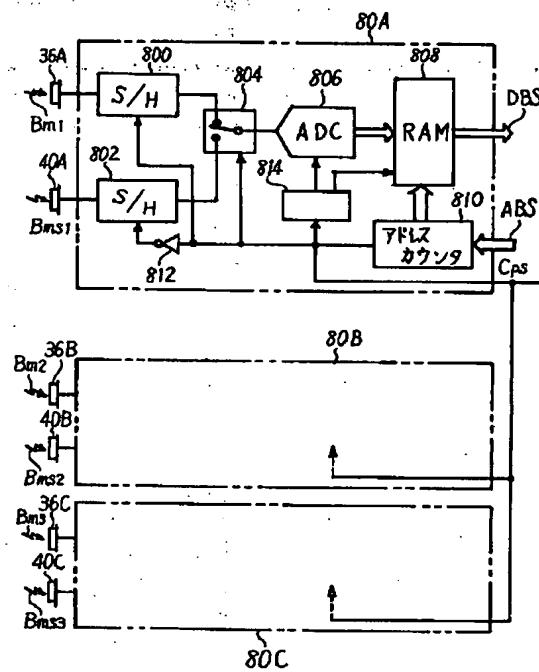
【図3】



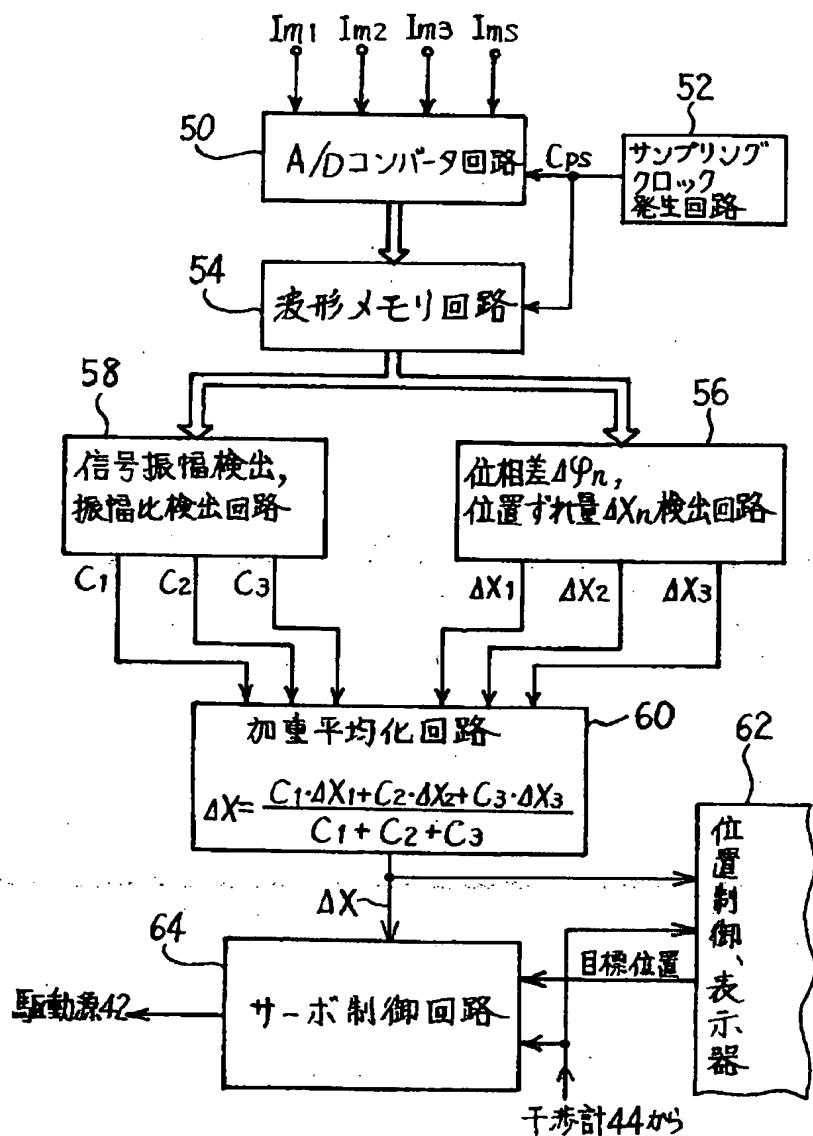
【図7】



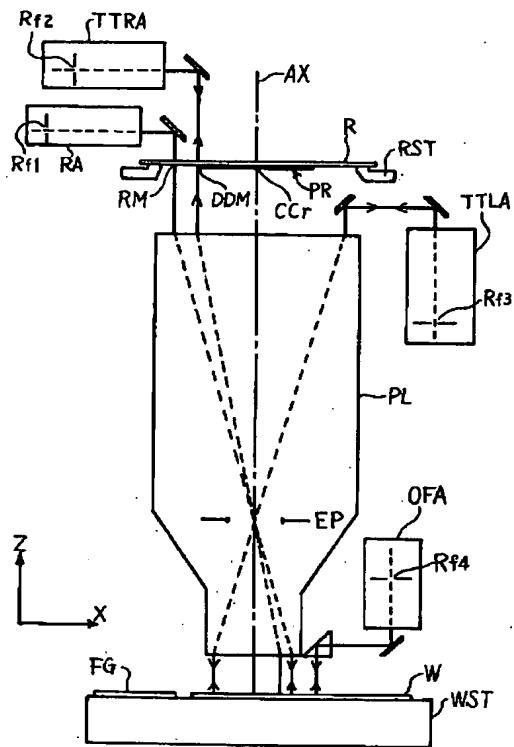
【図8】



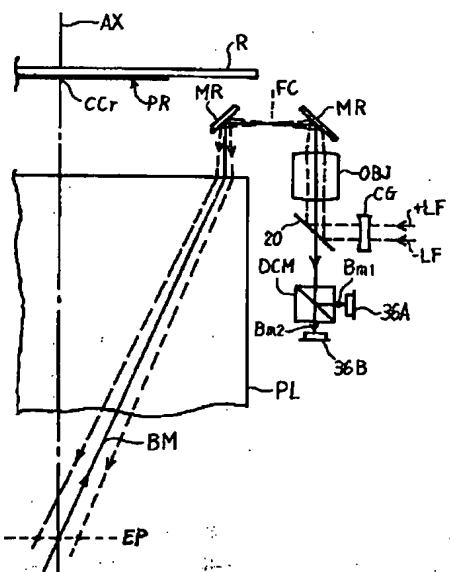
【図6】



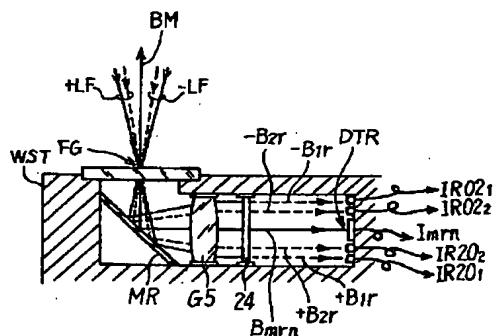
【図 9】



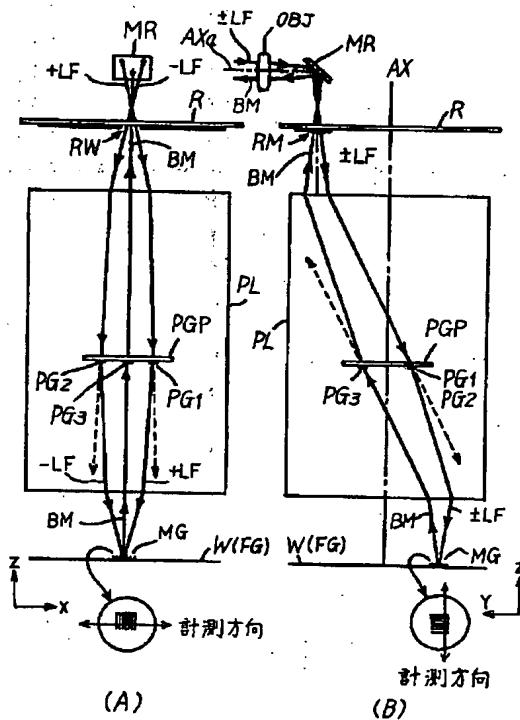
【図 10】



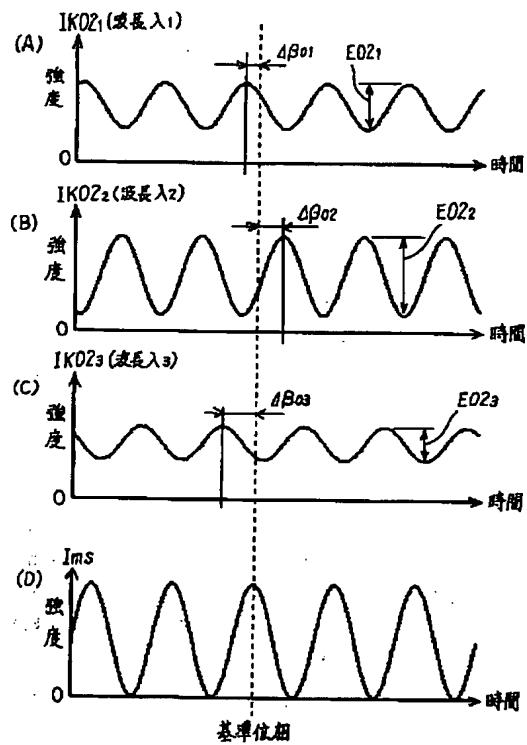
【図 16】



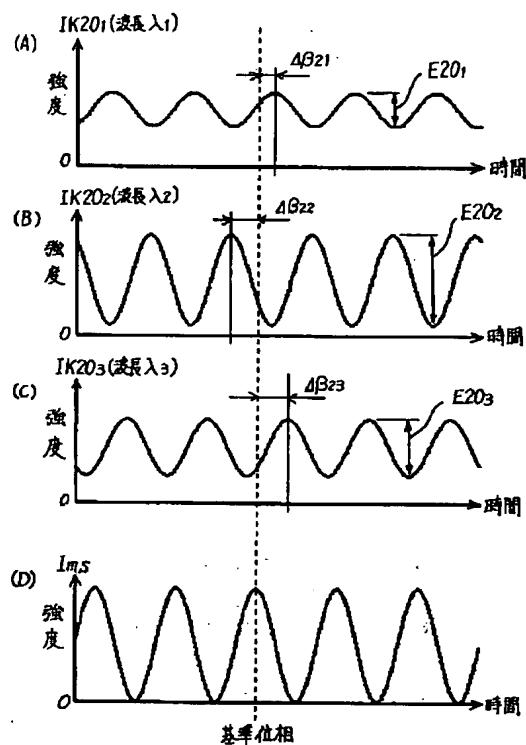
【図 11】



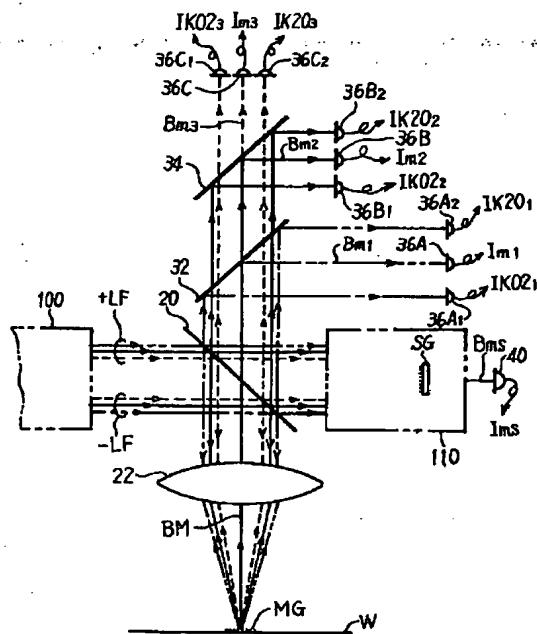
【図12】



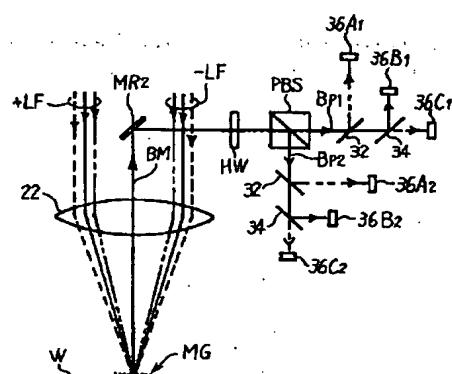
【図13】



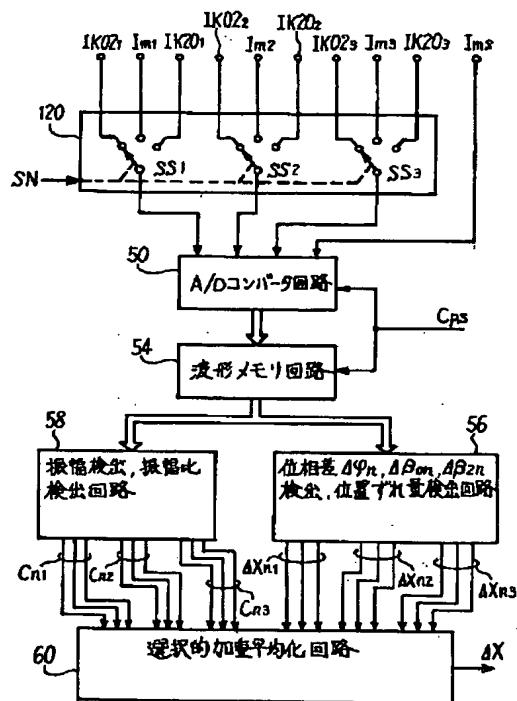
【図14】



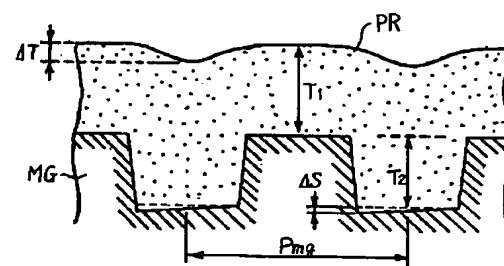
【図17】



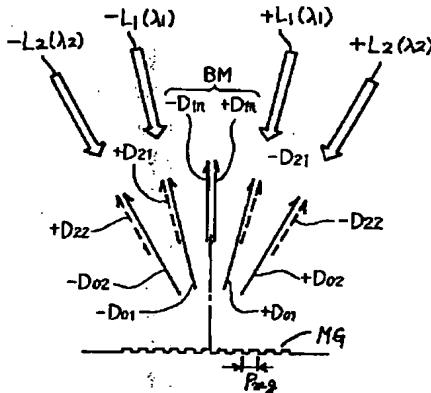
【図 1.5】



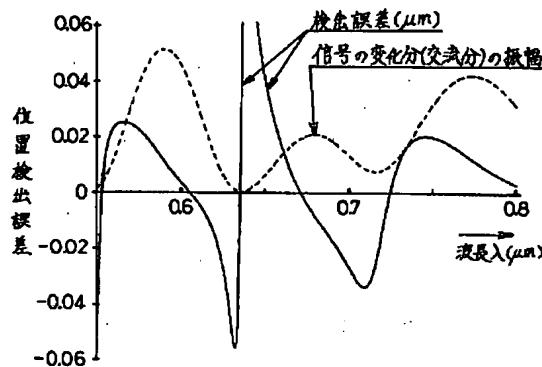
【図 1.8】



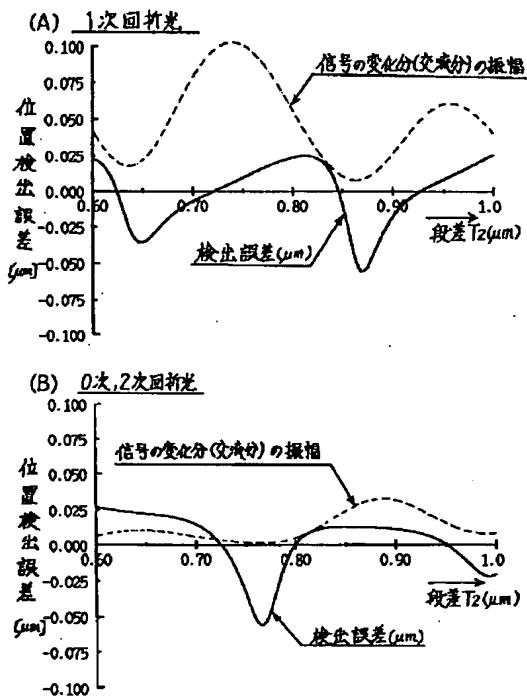
【図 2.0】



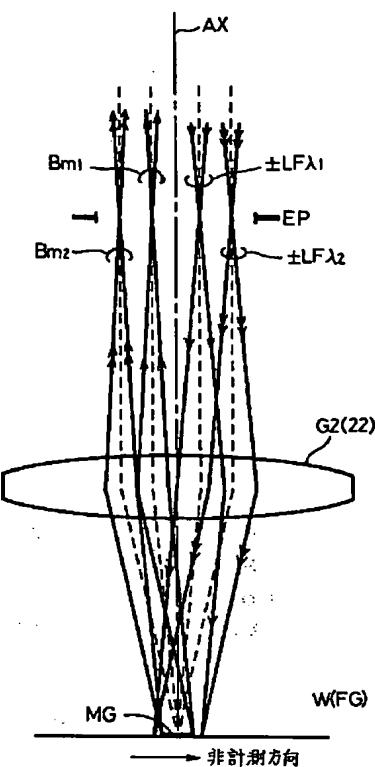
【図 1.9】



【図21】



【図22】



【手続補正書】

【提出日】平成7年5月25日

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0045

【補正方法】変更

【補正内容】

【0045】関数（または式） $F(I_{m1})$ 、 $F(I_{m2})$ は各信号が I_{m1} 、 I_{m2} が正弦波状であることから、正弦関数または余弦関数を使う。一例として、先に述べた信

号 I_{m1} のピークレベルを E_{p1} 、ボトムレベルを E_{b1} とし、検出すべき位置における信号 I_{m1} のレベルを e_1 とすると、

$$(E_{p1} + E_{b1}) / 2 + \{ (E_{p1} - E_{b1}) \sin \phi_1 \} / 2 = e_1$$

を満たすラジアン ϕ_1 を求め、これをピッチ P_{mg} の値を使った以下の変換式に代入すれば、基準点からのずれ量 ΔX_1 がわかる。